This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

Phys 3202.76
HARVARD COLLEGE LIBRARY

BOUGHT FROM THE INCOME OF THE FUND
BEQUEATHED BY
PETER PAUL FRANCIS DEGRAND
(1787-1855)
OF BOSTON

FOR FRENCH WORKS AND PERIODICALS ON THE EXACT SCIENCES
AND ON CHEMISTRY, ASTRONOMY AND OTHER SCIENCES
APPLIED TO THE ARTS AND TO NAVIGATION

TRAITÉ

D'ÉLECTRICITÉ STATIQUE

Droit de traduction réservé.

Typographie Lahure, rue de Fleurus, 9, à Paris.

TRAITÉ

D'ÉLECTRICITÉ STATIQUE

PAR

M. E. MASCART

PROFESSEUR DE PHYSIQUE AU COLLÈGE DE FRANCE

TOME SECOND

PARIS

G. MASSON, ÉDITEUR

LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

PLACE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE, 17

1876

Phys 3208.76

HARVARD COLLEGE
FEB 7 1921
LIBRARY
Degrand fund

TRAITÉ

D'ÉLECTRICITÉ STATIQUE

CHAPITRE X

DÉCHARGES CONDUCTIVES

PHÉNOMÈNES CALORIFIQUES.

405. Lorsque deux corps conducteurs électrisés à des potentiels différents sont réunis par un arc métallique, les deux corps sont ramenés au même potentiel et il s'écoule de l'un à l'autre une certaine quantité d'électricité. Faraday appelle *décharge conductive* celle qui a lieu quand l'arc intermédiaire est entièrement formé de corps conducteurs comme les métaux, et *décharge disruptive* celle qui se produit au travers d'un milieu plus ou moins isolant, comme on l'observe dans l'air par la formation d'une étincelle. Cette distinction ne peut pas être plus absolue que la division des corps eux-mêmes en bons et mauvais conducteurs (6) de l'électricité.

D'autre part, les deux genres de phénomènes s'accompagnent toujours puisque la décharge commence avant que le contact ait été établi, mais on peut faire dominer l'un ou l'autre en choisissant convenablement la nature des intermédiaires.

Ainsi nous avons vu, à propos des thermomètres électriques (321) que, dans la décharge d'une batterie, l'énergie électrique se manifeste par l'échauffement des conducteurs et par le travail

qui correspond au phénomène de l'étincelle. Si la conductibilité du circuit parcouru par la décharge n'est pas très-grande, la puissance de l'étincelle peut être considérablement affaiblie et la plus grande partie de l'énergie sera transformée en chaleur.

Enfin, si les conducteurs qui réunissent les deux armatures d'une batterie sont formés par des tringles métalliques de petite longueur, sur le trajet desquelles on interpose un thermomètre à fil métallique long et fin, le dégagement de chaleur en dehors du thermomètre sera extrêmement faible. Dans ces conditions, on peut admettre que la quantité de chaleur dégagée dans le fil du thermomètre est, sinon égale, du moins proportionnelle à l'énergie totale de la batterie. La proportionnalité est rigoureuse tant que le circuit reste le même, mais elle est encore suffisamment exacte lorsqu'on modifie la disposition des conducteurs à faible résistance, et qu'on augmente ou diminue le nombre des bouteilles de la batterie. C'est ce dégagement de chaleur que nous allons d'abord étudier.

406. **Disposition des expériences.** — Pour déterminer en même temps les quantités d'électricité et la chaleur dégagée, on peut disposer l'expérience de plusieurs manières. On réunit, par exemple, l'armature intérieure d'une batterie avec une machine électrique, et l'armature extérieure avec le sol par l'intermédiaire d'une bouteille de Lane. D'autre part, l'une des boules du thermomètre électrique communique avec l'armature intérieure et, au moment de la décharge, on réunit l'autre boule du thermomètre à l'armature extérieure par un conducteur. On peut encore placer la bouteille de Lane entre la machine et l'armature intérieure de la batterie et relier l'armature extérieure de la batterie directement avec le sol, puis décharger la batterie par l'intermédiaire du thermomètre. Les deux dispositions sont à peu près équivalentes.

Pour effectuer les décharges, on peut se servir de l'excitateur électrique à manches de verre, comme on le voit fig. 76, en touchant l'armature extérieure de la batterie par l'une des branches, et rapprochant l'autre branche du thermomètre relié à la deuxième armature.

L'*excitateur universel* de Henley est d'un emploi plus commode. Cet appareil (fig. 159) se compose de deux tiges de métal,

AD et A'D', montées sur deux colonnes de verre C et C', pouvant se rapprocher plus ou moins et tourner autour de charnières. Une tablette P est destinée à supporter les corps par lesquels on veut faire passer les décharges. Pour l'expérience actuelle, par exemple, on dispose les branches de façon qu'elles puissent se toucher; l'une d'elles étant fixée horizontalement, l'autre est maintenue relevée, soit par un fil, soit par le frottement de la charnière. Au moment de la décharge, les communications étant convenablement établies, on laisse tomber la seconde branche de

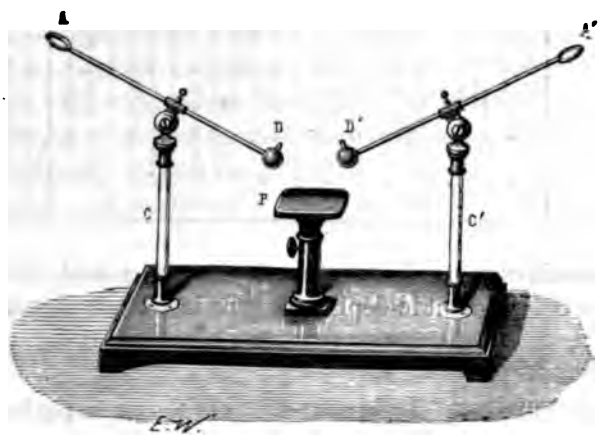


Fig. 159.

l'excitateur sur la première ou on l'abaisse jusqu'au contact avec une baguette de verre.

407. Décharge totale des batteries. — Expériences de M. Riess. — M. Riess (1) a étudié d'abord le rapport qui existe entre la charge électrique totale, le nombre des bouteilles de la batterie et la quantité de chaleur produite par la décharge totale. Toutes les bouteilles ont été choisies aussi identiques que possible, et l'on pouvait vérifier d'ailleurs cette identité par les expériences elles-mêmes. Le fil de platine du thermomètre avait $\frac{1}{10}$ de ligne d'épaisseur, les bouteilles un pied carré et demi de surface, et les boules de la bouteille de Lane étaient écartées d'une ligne.

(1) Riess. *Reibungselektricität*, bd. I, p. 399. — *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. LXIX, p. 120.

Le tableau suivant donne la moyenne des résultats obtenus pour le déplacement de la colonne liquide, exprimé en lignes, dans trois séries d'expériences

NOMBRE D'ÉTINCELLES DE LA BOUTEILLE DE LANE	2 BOUTEILLES		3 BOUTEILLES		4 BOUTEILLES		5 BOUTEILLES		6 BOUTEILLES	
	OBS.	CAL.	OBS.	CAL.	OBS.	CAL.	OBS.	CAL.	OBS.	CAL.
2	1,5	1,8	»	»	»	»	»	»	»	»
3	4,3	4	3	2,6	2	2	1,5	1,6	»	»
4	6,7	7	4,5	4,7	3,2	3,5	3	2,8	2,6	2,3
5	9,3	11	7	7,3	5,2	5,5	4,5	4,4	3,8	3,7
6	13,4	15,8	9,7	10,6	7,3	7,9	6,5	6,3	5,5	5,3
7	»	»	15	14,4	11	10,8	8,8	8,6	7,5	7,2
8	»	»	17,5	18,8	14,1	14,1	11,3	11,3	9,3	9,4
9	»	»	»	»	17,8	17,8	14,3	14,3	11,7	11,9
10	»	»	»	»	»	»	16,7	17,6	14,3	14,7

Les nombres indiqués dans les colonnes de calcul ont été obtenus en déterminant le déplacement de la colonne liquide d par la formule $d = a\frac{M^2}{n}$, dans laquelle on a donné à la constante a la valeur 0,88; on voit que cette formule s'accorde parfaitement avec l'expérience.

Il résulte de là que *la quantité de chaleur dégagée dans l'instrument est proportionnelle au carré de la quantité d'électricité et en raison inverse du nombre des bouteilles de la batterie.*

M. Harris avait déjà observé dans une série d'expériences faites avec son thermomètre électrique (323) que la quantité de chaleur dégagée par une décharge est proportionnelle au carré de la quantité d'électricité, mais il la croyait indépendante de la tension ou de l'intensité, c'est-à-dire de la surface de la batterie et de l'épaisseur des bouteilles sur lesquelles l'électricité était accumulée (1).

On peut écrire encore

$$d = a\left(\frac{M}{n}\right)M.$$

(1) *Phil. trans.* (1834), p. 225.

Le quotient $\left(\frac{M}{n}\right)$ de la charge totale par le nombre des bouteilles est proportionnel à l'épaisseur électrique moyenne. Par suite, *la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au produit de la charge totale par l'épaisseur électrique.*

Comme l'épaisseur électrique, ou la densité, est proportionnelle au potentiel de l'armature intérieure, on voit que *la quantité de chaleur est proportionnelle au produit de la quantité d'électricité par la chute du potentiel*, ce qui est conforme à la théorie (187).

Il résulte de là que, si l'on charge une batterie à refus avec une source électrique donnée, la chaleur produite par la décharge sera proportionnelle au nombre des bouteilles de la batterie. En effet, l'épaisseur moyenne est la même sur toutes les bouteilles si elles sont identiques, et la charge totale est alors proportionnelle au nombre des bouteilles.

On peut remarquer que l'accord du calcul avec l'expérience est plus satisfaisant à mesure que le nombre des bouteilles augmente; les densités électriques sont alors plus faibles et la déperdition moins rapide; en outre, le défaut d'identité des différentes bouteilles devient alors moins important.

408. **Expériences faites avec le thermomètre inscripteur.** — Ces lois peuvent être vérifiées d'une manière très-simple à l'aide du thermomètre inscripteur précédemment décrit (326). Les

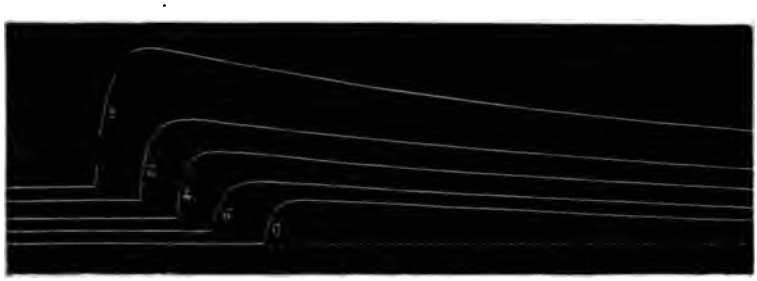


Fig. 160.

figures 160 et 161 reproduisent aussi exactement que possible, avec leurs détails et leurs imperfections, les courbes obtenues par des décharges électriques.

Dans les expériences de la figure 160, on a mis une charge

électrique constante (la bouteille de Lane étant sur le trajet de la machine à la batterie) sur une batterie formée d'un nombre de bouteilles variables, 2, 3, 4, 5 et 6, comme l'indiquent les numéros des courbes. La figure 161 correspond à des expériences dans lesquelles la batterie était la même et la charge variable;

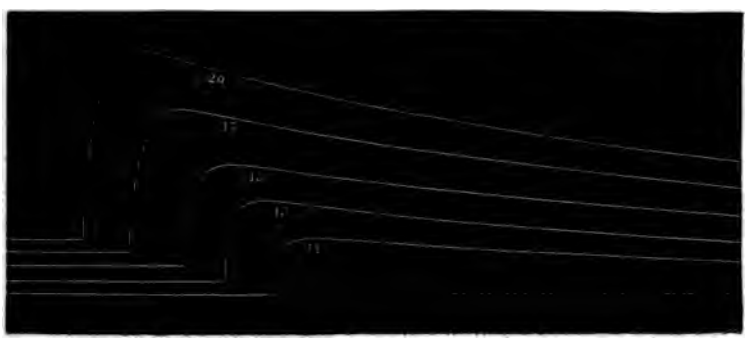


Fig. 161.

les numéros des courbes indiquent le nombre des étincelles de la bouteille de Lane. On obtient ainsi :

CHARGE CONSTANTE (FIG. 160.)

NOMBRE DES BOUTEILLES n	ORDONNÉE MAXIMUM h	PRODUIT nh
2	18,5	37,0
3	10,7	32,1
4	8,8	35,2
5	6,5	32,5
6	5,8	34,8

CHARGE VARIABLE (FIG. 161.)

NOMBRE DES ÉTINCELLES M	ORDONNÉE MAXIMUM h	$1000\,\frac{h}{M^3}$
11	7,4	60,9
13	10,6	60,3
15	13,3	59,6
17	19	66
20	25,5	63,7

Les produits renfermés dans la dernière colonne de chaque tableau sont sensiblement égaux entre eux, c'est-à-dire que la chaleur dégagée est en raison inverse du nombre des bouteilles de la batterie, et proportionnelle au carré de la charge.

Ces deux séries d'expériences n'ont été faites qu'une fois, uniquement pour vérifier la marche du thermomètre inscripteur; mais on voit, par la comparaison des tableaux, que la méthode comporte autant d'exactitude que l'emploi du thermomètre de M. Riess.

409. **Décharge incomplète. — Expériences de M. Riess.** — La décharge des batteries peut être effectuée d'une manière incomplète en opérant de la manière suivante: Une batterie de n bouteilles ayant une charge M, on réunit l'armature intérieure de cette batterie, par l'intermédiaire d'un thermomètre électrique, avec l'armature intérieure d'une autre batterie de n' bouteilles primitivement à l'état neutre, les deux armatures extérieures communiquant d'ailleurs avec le sol. On obtient alors une étincelle et un dégagement de chaleur, bien que l'ensemble des appareils reste chargé de la même quantité d'électricité.

La décharge complète, dans le premier cas, aurait fourni une quantité de chaleur Q qui, d'après les lois précédentes, serait donnée par l'équation

$$Q = A\frac{M^2}{n}.$$

Lorsque la même quantité d'électricité est répandue sur la nouvelle batterie de $n+n'$ bouteilles, elle est capable de fournir pendant sa décharge complète une quantité de chaleur égale à

$$Q' = A\frac{M^2}{n+n'}.$$

La chaleur $Q - Q'$ que donne la décharge incomplète doit être égale à la différence de ces deux nombres,

$$Q - Q' = A\frac{M^2}{n} - A\frac{M^2}{n+n'} = A\frac{M^2}{n}\left(1 - \frac{n}{n+n'}\right) = \frac{AM^2n'}{n(n+n')};$$

on déduit de là

$$\frac{Q - Q'}{Q} = \frac{n'}{n+n'} = \frac{1}{\frac{n}{n'}+1},$$

ou bien

$$Q - Q' = A \frac{M^2}{n\left(\frac{n}{n'} + 1\right)}.$$

Cette formule est une conséquence des lois précédentes, si l'on admet que la quantité totale de chaleur que peut fournir un conducteur électrisé est indépendante de la manière dont la décharge totale est effectuée.

L'échauffement du thermomètre dans la décharge incomplète peut donc être représenté par une expression de la forme

$$d = a \frac{M^2}{n\left(\frac{n}{n'} + 1\right)}.$$

410. Les expériences de M. Riess ont même porté sur le cas plus compliqué où les bouteilles des deux batteries ne sont point égales. L'armature intérieure de la première batterie communiquant avec la source et son armature extérieure avec le sol par l'intermédiaire de la bouteille de Lane, on peut opérer la décharge de deux manières, soit en réunissant les armatures extérieures entre elles et avec le sol, et joignant ensuite les deux armatures intérieures par un conducteur sur le trajet duquel est le thermomètre, comme on l'a supposé plus haut, soit au contraire en isolant les deux batteries, réunissant les deux armatures intérieures puis les deux armatures extérieures par l'intermédiaire du thermomètre. La quantité de chaleur est un peu plus faible dans le second cas, mais les lois sont les mêmes, et les résultats renfermés dans le tableau suivant ont été ainsi obtenus.

Les nombres de la dernière colonne ont été calculés d'après la formule empirique

$$d = a \frac{M^2}{n\left(\frac{n}{n'} + \frac{s'}{s}\right)},$$

dans laquelle s est la surface d'une des bouteilles de la première batterie et s' la surface d'une des bouteilles de la seconde.

NOMBRE DES BOUTEILLES		CHARGE DE LA 1re BATTERIE	ÉCHAUFFEMENT DU THERMOMÈTRE d	
1re BATTERIE n	2e BATTERIE n'	M	OBS.	CALC.
5	7	12	7	6,8
		14	9	9,2
		16	12	12
5	5	10	8,5	8,2
		12	11,4	11,8
		14	15,3	16,1
5	3	6	6,6	6,6
		8	11,7	11,7
		10	17,2	18,3
3	3	8	9,5	8,8
		10	13,3	13,7
		12	19,3	19,7
1	3	12	9,5	8,7
		14	12,3	11,9
		16	15,7	15,4

La formule trouvée empiriquement par M. Riess représente donc les phénomènes d'une manière très-exacte, et l'on voit qu'elle se réduit à celle que l'on pouvait prévoir pour le cas où les bouteilles des deux batteries sont identiques.

411. La théorie de ces décharges incomplètes (189) donnée par M. Clausius(1) conduit à la formule

$$d = a\frac{M^2}{n\left(\frac{n}{n'} + \frac{s'}{s}\frac{e}{e'}\right)},$$

dans laquelle e et e' désignent les épaisseurs des bouteilles qui appartiennent aux deux batteries différentes. Cette expression coïncide exactement avec celle de M. Riess, si l'on suppose que l'épaisseur du verre était la même dans les deux séries de bouteilles. Or, M. Riess avait déjà vérifié que l'électricité se parta-

(1) *Théorie mécanique de chaleur*, t. II, p. 73.

geait entre les deux batteries à peu près dans le rapport des surfaces; il a ensuite, à la demande de M. Clausius, essayé de déterminer directement ces épaisseurs, et évalué celle de la première batterie à 1 ligne $\frac{1}{3}$ et celle de la seconde à 1 ligne $\frac{1}{2}$; le rapport de ces épaisseurs serait donc égal à $\frac{2}{3}$. D'ailleurs, la mesure directe est fort difficile, parce que l'épaisseur du verre qui constitue une bouteille est loin d'être la même en tous les points; ce défaut était surtout manifeste pour la seconde batterie, et, dans ce cas, la moyenne des épaisseurs en différents points ne donne pas la valeur qu'il faudrait introduire dans les formules. On peut donc considérer les expériences de M. Riess comme entièrement conformes à la théorie.

412. **Décharge des cascades. — Expériences de M. Riess et de M. Dove.** — Enfin, il reste encore à examiner le cas de la charge en cascade. Considérons deux batteries, l'une de n bouteilles, l'autre de n' bouteilles, toutes identiques. L'armature intérieure de la première batterie communique avec la source, l'armature extérieure de la seconde est reliée au sol par une bouteille de Lane, et les deux autres armatures des deux batteries sont réunies ensemble. L'appareil étant ainsi électrisé, on le décharge en faisant communiquer les deux armatures extrêmes et en plaçant un thermomètre sur le trajet de cette communication; M. Riess a résumé ses expériences par la formule suivante :

$$d = a\,\mathrm{M}^2\left(\frac{1}{n}+\frac{1}{n'}\right).$$

Des expériences analogues avaient été faites par M. Dove [1] qui en avait déduit une formule différente

$$d = a\,\mathrm{M}^2\cdot\frac{1}{\sqrt{nn'}}.$$

Le tableau suivant [2] renferme les résultats des observations de M. Riess et de M. Dove, réduits à la même unité, qui correspond au cas où les deux nombres n et n' sont égaux, pour rendre les comparaisons plus faciles. Ces observations se partagent en

[1] *Pogg. Annal.*, t. LXXII, p. 406.
[2] Clausius, *Théorie mécanique de la chaleur*, t. II, p. 80.

deux séries : dans les premières expériences, laissant n' constant, on a successivement donné à n les valeurs n', $2n'$, $3n'$ et $4n'$; dans les autres, au contraire, c'est n qui est resté constant et l'on a fait varier n'.

NOMBRE DES BOUTEILLES		ÉCHAUFFEMENT DU THERMOMÈTRE			
		EXPÉRIENCES DE M. DOVE		EXPÉRIENCES DE M. RIESS	
1re BATTERIE	2e BATTERIE	OBS.	CAL.	OBS.	CAL.
n'	n'	1	1	1	1
$2n'$	»	0,72	0,71	0,76	0,75
$3n'$	»	0,59	0,58	0,69	0,67
$4n'$	»	0,51	0,50	0,66	0,63
n	n	1	1	1	1
»	$2n$	0,71	0,71	0,78	0,75
»	$3n$	0,60	0,58	0,72	0,67
»	$4n$	0,50	0,50	0,68	0,63

L'accord des nombres publiés par chaque observateur avec la formule qu'il en a déduite est très-satisfaisant, et les expériences de chacun de ces physiciens sont incompatibles avec la formule donnée par l'autre. La concordance des résultats obtenus par M. Riess paraît même moins satisfaisante, mais les formules qu'il a établies, tant pour le cas des cascades que pour les décharges complètes ou incomplètes, ont reçu plus tard la sanction de la théorie (190) et doivent être considérées comme la véritable représentation des phénomènes.

413. **Distribution de la chaleur dans les différentes parties du conducteur.** — Dans les expériences précédentes, le circuit traversé par le flux électrique était à peu près constant, l'accroissement de résistance causé par l'addition ou la soustraction de différentes bouteilles était insignifiant par rapport à la résistance du fil de platine, et la chaleur produite dans le thermomètre était toujours proportionnelle à la chaleur totale, ce qui suffit pour la vérification des lois. On peut se proposer de déterminer

comment cette chaleur totale se distribue dans les différentes parties du circuit. M. Harris [1] avait déjà constaté que le dégagement de chaleur dans le thermomètre est en raison inverse de la longueur du circuit, quand ce circuit est formé d'un fil métallique. Ainsi, il a obtenu une élévation de température de 10 degrés avec un circuit de 300 pieds de fil de cuivre, 5 ou 6 degrés seulement avec une longueur de 600 pieds et un peu plus de 3 degrés pour u. circuit de 900 pieds. Cette expérience se conçoit aisément, car une même quantité de chaleur se distribuant sur l'arc conducteur tout entier, il ne doit s'en dégager en chaque point qu'une fraction en raison inverse de la longueur totale.

414. **Expériences de M. Riess.** — M. Riess a employé pour étudier cette loi plusieurs procédés différents.

Dans une première série d'expériences, il interposait sur le trajet parcouru par la décharge deux fils de platine de même diamètre, l'un placé dans l'intérieur du thermomètre, et l'autre en dehors, de façon que la somme des longueurs des deux fils fût constante; de cette manière, la nature du circuit total n'était pas modifiée. Il paraît bien évident que, dans ces circonstances, la quantité de chaleur dégagée sur le fil entier doit être constante pour une même charge, et que la chaleur dégagée dans le thermomètre sera proportionnelle à la longueur du fil qu'il renferme; c'est ce que montrent les expériences.

De la formule

$$d = a\frac{M'}{n} \quad \text{ou} \quad a = d\frac{n}{M'},$$

qui représente la loi d'échauffement du thermomètre quand on fait varier seulement la charge et le nombre des bouteilles de la batterie, on déduit la valeur du coefficient a ou du déplacement de la colonne liquide pour une seule bouteille et une charge égale à l'unité. Dans le tableau suivant, la valeur de a est la moyenne d'un grand nombre d'observations dans lesquelles la batterie avait de 3 à 5 bouteilles, et le nombre d'étincelles a varié de 3 à 10.

[1] *Phil trans.* (1834), p. 228.

FIL DU THERMOMÈTRE l	FIL EXTÉRIEUR l'	TOTAL $l+l'$	a	$\frac{l}{a}$	$T-t$
123',7	6'	129,7	1,32	93,5	0°,238
96 ,7	33	»	1,00	96,7	0,228
67 ,7	62	»	0,74	91,5	0,239
42	87,7	»	0,16	91,3	0,237

Dans ces expériences, le diamètre de la boule du thermomètre étant de 3^pouces 1/2 ou 94^mm,74, le volume du gaz renfermé dans le ballon était d'environ 0^lit,445, et son poids de 0^gr,57. Le fil de platine de 129',7 (279^mm,05) ayant 0',05 de rayon, (0^mm,11279), son volume était de 11^mmc,15, et son poids 0^gr,245, c'est-à-dire à peine la moitié du poids de l'air. Comme la chaleur spécifique du platine 0,0324 est environ le $\frac{1}{8}$ de la chaleur spécifique de l'air à pression constante 0,237 et le $\frac{1}{5}$ de la chaleur spécifique de l'air à volume constant, il en résulte que, si le fil de platine était supprimé en totalité, la masse réduite en eau du thermomètre ne varierait que d'un dixième avec les calculs les plus défavorables. Or, la longueur du fil n'a été réduite qu'au tiers de sa valeur primitive dans la quatrième expérience, et la valeur en eau de l'appareil thermométrique n'a pas varié du $\frac{1}{16}$ de sa valeur moyenne.

On ne commet donc pas une erreur de $\frac{1}{20}$, et la précision des expériences n'est guère plus grande, en supposant que cette masse est constante; alors les quantités de chaleur dégagées peuvent être considérées comme proportionnelles aux déplacements de la colonne liquide. Si la quantité de chaleur est proportionnelle à la longueur du fil, le rapport $\frac{l}{a}$ doit être constant. Le tableau montre qu'il en est ainsi sensiblement et que les premiers nombres sont plus forts que les derniers, ce qui doit être, puisque, la masse totale diminuant, les valeurs de a sont à la fin plus grandes que si la masse n'avait pas changé.

M. Riess a fait les calculs d'une manière plus complète en employant la chaleur spécifique de l'air sous volume constant et en déterminant l'échauffement $(T-t)$ du fil de platine. La der-

nière colonne du tableau montre que cet échauffement est le même dans toutes les expériences, et que, par suite, la quantité de chaleur dégagée est bien proportionnelle à la longueur du fil.

415. Dans une deuxième série d'expériences, M. Riess a employé des fils de platine d'épaisseurs différentes, pour étudier l'influence de la section du fil. Il s'est servi de 5 fils de platine recuits dont il a mesuré le diamètre avec un microscope micrométrique.

		mm.
Fil N° I	rayon = 0^{l},03964	0,089
— N° II	— 0,023212	0,052
— N° III	— 0,058304	0,131
— N° IV	— 0,03617	0,082
— N° V	— 0,080486	0,182

On comparait ces fils deux à deux en plaçant l'un dans le thermomètre et l'autre à l'extérieur, puis en recommençant l'expérience, de façon que le premier fil fût en dehors de l'appareil thermométrique et le second dans la boule.

COMPARAISON DES FILS I ET V.

FIL N° I DANS LA BOULE.	FIL N° V DANS LA BOULE.
$l = 86^{l},2$	$l' = 105,4$
$r = 0,0396$	$r' = 0,0805$
$a = 1,05$	$a' = 0,25$
$T - t = 0°,2684$	$T' - t' = 0°,0141$

La quantité de chaleur étant proportionnelle à la longueur de chaque fil, si elle aussi est en raison inverse de la section, on doit avoir, en supposant la masse de l'appareil thermométrique sensiblement constante,

$$\frac{a}{a'} = \frac{l}{l'}\left(\frac{r'}{r}\right)^{2}.$$

L'expérience donne

$$\frac{a}{a'} = 4,20;$$

$$\frac{l}{l'}\left(\frac{r'}{r}\right)^{2} = 3,38.$$

Si la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle à la longueur du fil et en raison inverse de la section, comme le poids du fil est proportionnel à la longueur et à la section, l'élévation de température $T - t$ de chaque fil sera proportionnelle à l'expression

$$\frac{\frac{l}{s}}{ls} = \frac{1}{s^2},$$

c'est-à-dire en raison inverse du carré de la section ou de la quatrième puissance du rayon.

L'expérience donne

$$\left(\frac{r'}{r}\right)^4 = 17,18;$$
$$\frac{T - t}{T' - t'} = 19,03.$$

En d'autres termes, l'échauffemement du second fil calculé d'après la première expérience devrait être

$$T' - t' = \frac{0^\circ,2684}{17,18} = 0^\circ,0158.$$

Le nombre $0^\circ,0141$ déduit de l'observation directe est donc trop faible de $\frac{1}{9}$; M. Riess attribue cette différence à ce que le diamètre du fil était notablement plus gros dans la seconde expérience; la chaleur s'est alors communiquée à l'air d'une manière plus lente et le refroidissement du gaz par les parois du ballon a été notablement augmenté.

Le calcul approché montre aussi que le rapport $\frac{a}{a'}$ des échauffements relatifs à une seule bouteille et une étincelle est beaucoup trop grand; ce résultat est dû en partie au refroidissement du gaz, mais surtout à l'accroissement sensible de la masse totale du thermomètre dans la seconde expérience.

Les expériences suivantes conduisent exactement aux mêmes conséquences, et l'on voit que le calcul approché donne des résultats aussi exacts que la détermination des températures.

COMPARAISON DES FILS IV ET III.

FIL N° IV DANS LA BOULE.	FIL N° III DANS LA BOULE.
$l = 59^{l},7$	$l' = 100^{l},4$
$r = 0,036$	$r' = 0,058$
$a = 0,91$	$a' = 0,56$
$T - t = 0°,3775$	$T' - t' = 0°,0592$
$\frac{a}{a'} = 1,63,$	$\frac{T-t}{T'-t'} = 6,377,$
$\frac{l}{l'}\left(\frac{r'}{r}\right)^2 = 1,55;$	$\left(\frac{r'}{r}\right)^4 = 6,74.$

COMPARAISON DES FILS II ET I.

FIL N° II DANS LA BOULE.	FIL N° I DANS LA BOULE.
$l = 42^{l},2$	$l' = 85^{l},8$
$r = 0,025$	$r' = 0,0396$
$a = 0,89$	$a' = 0,62$
$T - t = 1°,3196$	$T' - t' = 0°,1588$
$\frac{a}{a'} = 1,435,$	$\frac{T-t}{T'-t'} = 8,31,$
$\frac{l}{l'}\left(\frac{r'}{r}\right)^2 = 1,456;$	$\left(\frac{r'}{r}\right)^4 = 8,79.$

Ainsi, *quand une décharge électrique s'effectue dans un circuit composé de fils différents de même nature, chacun des fils prend une quantité de chaleur proportionnelle à sa longueur et en raison inverse de sa section.*

416. Dans une troisième série d'expériences, le thermomètre est resté constant et l'on a intercalé sur le trajet de la décharge un fil de cuivre de longueur variable. Ce fil avait $0^{l},29$ ($0^{mm},65$) de diamètre et une longueur de plusieurs centaines de pieds; il était enroulé sur un cadre formé avec des bâtons de verre à une distance de 5 pieds l'un de l'autre. On ajoutait successivement, dans le circuit général, diverses portions de ce fil et on déterminait chaque fois la valeur du coefficient a par de nombreuses expériences, en variant la charge et le nombre des bouteilles de la batterie. On peut déduire des lois précédentes la relation qui doit exister entre la longueur du fil de cuivre ajouté et la valeur de a correspondante.

En effet, désignons par L la longueur de ce fil de cuivre qui offrirait la même résistance, c'est-à-dire produirait le même

effet, que toute la portion du circuit qui reste invariable dans les différentes expériences et par λ la longueur du fil de cuivre ajouté. La quantité totale de chaleur que produit une décharge donnée se partage entre les deux parties du circuit proportionnellement à leur longueur ; une fraction $\frac{L}{L+\lambda}$ se porte sur le conducteur constant, et le reste $\frac{\lambda}{L+\lambda}$ sur le fil ajouté. Le thermomètre étant invariable, la quantité de chaleur qu'il prend est proportionnelle à la fraction $\frac{L}{L+\lambda}$ ou $\frac{1}{1+\frac{\lambda}{L}}$,

ce qui donne l'expression

$$d = \frac{a}{1+b\lambda},$$

dans laquelle a est la valeur de d qui correspond au circuit constant, et b un coefficient à déterminer. On peut calculer ce coefficient par chacune des expériences, puisque l'on connaît les valeurs de d, a et λ ; le tableau suivant montre que l'on obtient ainsi un nombre constant, c'est-à-dire que la formule représente bien le phénomène.

LONGUEUR DU FIL AJOUTÉ λ	ÉCHAUFFEMENT DU THERMOMÈTRE d	$b = \frac{\frac{a}{d} - 1}{\lambda}$	ÉCHAUFFEMENT CALCULÉ
0 pieds	0,78	»	0,78
9,6	0,69	0,0136	0,695
49,4	0,48	0,0127	0,476
98,0	0,34	0,0131	0,342
147,7	0,27	0,0128	0,267
246,4	0,21	0,0110	0,186

La dernière colonne renferme les valeurs de d calculées en prenant pour b la valeur moyenne 0,013. L'accord est aussi satisfaisant que possible, le dernier nombre seul présente une différence notable qui peut tenir à ce que l'échauffement du thermomètre était alors très-faible.

417. Cette méthode, dans laquelle on détermine par différence la quantité de chaleur absorbée par le fil additionnel, permet d'étudier plus facilement l'influence du diamètre et de la nature du fil. Si l'on opère avec des fils de même nature, comme la quantité de chaleur que prend un fil est proportionnelle à sa longueur et en raison inverse de sa section ou du carré de son rayon, il nous suffira, pour représenter les phénomènes, de diviser dans la formule précédente la longueur λ par le carré ρ^2 du rayon du fil, et l'on devra avoir

$$d = \frac{a}{1 + b' \frac{\lambda}{\rho^2}}.$$

L'expérience a été faite avec les fils de platine déjà employés et avec de nouveaux fils dont les rayons étaient

		mm.
N° VI	Rayon = 0^l,050	0,113
N° VII	— 0,0525	0,075
N° VIII	— 0,0765	0,172
N° IX	— 0,1161	0,262

On voit, par le tableau suivant, que les différentes expériences donnent pour b' un nombre constant; si l'on calcule la valeur de d en prenant pour b' la moyenne 0,00000888, on obtient, comme le montre la dernière colonne, des nombres qui sont en parfait accord avec l'observation.

FIL AJOUTÉ			ÉCHAUFFEMENT DU THERMOMÈTRE d	$b' = \frac{\rho^2}{\lambda}\left(\frac{a}{d} - 1\right)$	ÉCHAUFFEMENT CALCULÉ
N°s	λ	ρ			
»	0^l	»	1,55	»	1,55
IX	144	0^l,116	1,25	0,00000912	1,253
VIII	144	0,0765	1,11	» 880	1,108
III	100,4	0,0585	1,06	» 926	1,069
VI	144	0,050	0,91	» 840	0,895
I	84	0,0596	0,92	» 874	0,915
VII	17	0,0525	1,18	» 897	1,181

418. **Résistances spécifiques des métaux.** — Ces différentes lois peuvent être exprimées par des formules très-simples. Considérons un circuit formé de plusieurs fils métalliques de lon-

gueurs l, l', l''..., de sections s, s', s''... et de natures différentes. La quantité de chaleur prise par chaque fil est proportionnelle au rapport $\frac{l}{s}$ et à un facteur particulier $\frac{1}{c}$ qui dépend de la nature du métal. L'expression $\frac{l}{cs}$ peut être appelée la *résistance* du fil ; c'est la longueur λ d'un fil de comparaison pour lequel on ferait $c=1$ et qui, ayant une section égale à l'unité, produirait le même effet que le fil proposé. Le coefficient c est le *coefficient de conductibilité* ou la *conductibilité spécifique* du métal considéré, et l'inverse $\frac{1}{c}$ est la *résistance spécifique* du métal. Désignons, de même, par λ' λ'',... les résistances $\frac{l'}{c's'}$, $\frac{l''}{c''s''}$ ... des différentes portions du circuit formées de métaux différents ; la quantité totale Q de chaleur que produit l'étincelle se partagera sur tous les fils proportionnellement à leurs résistances, et la quantité de chaleur q prise par le premier fil sera

$$q=Q\frac{\lambda}{\lambda+\lambda'+\lambda''+\ldots}=Q\frac{\frac{l}{cs}}{\frac{l}{cs}+\frac{l'}{c's'}+\frac{l''}{c''s''}+\ldots}.$$

On calculera, de la même manière, la quantité de chaleur prise par les autres fils.

419. On peut déterminer par expérience les résistances spécifiques de différents métaux; il suffit, en effet, de déduire des observations la valeur de b qui entre dans l'équation

$$d=\frac{a}{1+b\lambda},$$

en prenant pour fil additionnel celui qui sert d'étalon. On substitue alors à ce fil un autre fil quelconque, et la valeur d que l'on obtient permet de calculer la longueur λ du fil étalon équivalente. On mesure la longueur l et la section s du fil proposé pour calculer la valeur de c par l'équation

$$\lambda=\frac{l}{cs}.$$

En opérant de cette manière, M. Riess a obtenu les résultats suivants pour un certain nombre de métaux, par rapport au platine pris pour unité :

MÉTAUX	RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE	COEFFICIENT D'ÉCHAUFFEMENT
Argent	0,1045	0,1267
Cuivre	0,1552	0,1133
Or	0,1746	0,2112
Cadmium	0,4047	0,58
Laiton	0,5602	0,3861
Palladium	0,8535	»
Fer	0,8789	0,708
Platine	1	1
Etain	1,053	1,57
Nickel	1,180	0,8727
Plomb	1,503	2,876
Maillechort	1,752	»

420. **Echauffement comparatif des différents métaux.** — La quantité de chaleur que prend un fil étant proportionnelle à sa résistance, l'élévation de température sera en raison inverse de la densité du métal et de sa chaleur spécifique. On peut donc représenter par un coefficient particulier la faculté plus ou moins grande que possède un fil de s'échauffer sous l'influence d'une décharge électrique. Les nombres de la dernière colonne du tableau précédent, ainsi calculés, sont proportionnels aux élévations de température qu'éprouveraient des fils différents, de même section, placés sur le trajet de la même décharge électrique. Ces nombres ne varient pas dans l'ordre de fusibilité des métaux, et ils présentent entre eux de telles différences, qu'on ne peut avoir aucune idée de la facilité avec laquelle on fondra un fil métallique par la température de fusion du métal.

Si l'on veut comparer la *résistance à la fusion* de différents métaux de même section situés sur le trajet d'une décharge et primitivement à zéro, il suffit, en supposant constante la chaleur spécifique de chaque métal et négligeant la chaleur latente, de diviser respectivement la température de fusion du métal par le nombre correspondant de la dernière colonne, et de comparer tous les résultats ainsi obtenus à celui qui convient au platine.

MÉTAUX	TEMPÉRATURE DE FUSION	COEFFICIENT D'ÉCHAUFFEMENT	RÉSISTANCE A LA FUSION
Cuivre.	1100°	0,1133	4,893
Argent.	1000	0,1267	3,946
Or.	1250	0,2112	2,960
Fer.	1500	0,7080	1,059
Platine.	2000	1	1
Nickel.	1600	0,8727	0,916
Cadmium.	360	0,58	0,510
Etain.	228	1,57	0,072
Plomb.	335	2,876	0,058

Comme l'échauffement d'un fil, toutes choses égales d'ailleurs, est en raison inverse du carré de la section, il résulte de ce tableau que, pour qu'une décharge électrique fonde un fil de cuivre et un fil de platine, par exemple, placés à la suite l'un de l'autre, il faut que le rapport des sections du platine et du cuivre soit égal à $\sqrt{4,893} = 2,212$, ou le rapport des diamètres égal à $\sqrt{2,212} = 1,487$.

Priestley [1] avait essayé déjà de comparer les pouvoirs conducteurs de différents métaux par la résistance que présentaient à la fusion des fils de même épaisseur traversés par une même décharge électrique, et il les rangea dans l'ordre suivant : *fer*, *étain*, *cuivre*, *argent* et *or*. Cette classification ne s'accorde pas avec les résultats du tableau qui précède et, en tout cas, la méthode ne donne pas l'ordre des conductibilités.

M. Harris [2] avait cherché à déterminer le rapport des conductibilités électriques des métaux en faisant passer une même décharge électrique dans son thermomètre où il plaçait successivement des fils de mêmes dimensions et de métaux différents. Le rapport des quantités de chaleur dégagées dans deux expériences n'est pas égal au rapport inverse des conductibilités, comme le croyait M. Harris ; ces expériences permettent seulement de classer les métaux suivant l'ordre de leurs conductibilités. La liste suivante qu'on en déduit : *plomb*, *étain*, *fer*, *zinc*, *or* et *cuivre* s'accorde en effet avec les résultats de M. Riess.

(1) *Histoire de l'électricité*, t. III, p. 455.
(2) *Phil. trans.* (1827), p. 18.

421. **Emploi de la fusion des fils comme thermomètre électrique.** — Si l'on interpose, sur le trajet d'une décharge électrique, un fil métallique assez résistant pour qu'il absorbe en presque totalité la chaleur dégagée, on peut déterminer par expérience les dimensions que doit avoir le fil pour qu'il atteigne sa température de fusion sans la dépasser, et l'on pourra évaluer ainsi, d'une manière assez exacte, l'énergie électrique de la décharge. Soient Q la quantité totale de chaleur, T la température de fusion, l et s les dimensions du fil, d sa densité, K sa chaleur latente de fusion et C sa chaleur spécifique moyenne. Si le fil est primitivement à zéro, on aura

$$Q = lsd(CT + K).$$

Si l'on emploie ce moyen pour étudier les décharges des batteries, par exemple, on vérifiera sans difficulté que la longueur limite que l'on peut fondre est proportionnelle au carré de la charge et en raison inverse de la surface de la batterie.

C'est là la méthode la plus expéditive, et non la moins exacte, de vérifier les lois des décharges, mais elle exige quelques précautions. Il faut choisir d'abord des métaux très-ductiles pour qu'on puisse les étirer en fils fins, et de préférence très-résistants, comme le fer et le platine, afin que la quantité de chaleur dégagée dans les autres portions du circuit soit négligeable.

De plus, la fusion du métal doit se faire très-nettement, afin qu'il n'y ait pas de doute sur la longueur limite; ainsi le laiton ne convient pas pour ce genre d'expériences, parce que l'alliage se ramollit bien avant de fondre d'une manière complète. Le métal qui donne les meilleurs résultats est le fer ou l'acier qui se détache en gouttelettes aussitôt que la température de fusion est atteinte.

Ainsi, si l'on charge une batterie par l'intermédiaire d'une bouteille de Lane, et si l'on règle la distance explosive de cette bouteille de façon que la batterie chargée par 50 étincelles soit capable de fondre 25 centimètres d'un fil de fer de $\frac{1}{10}$ de millimètre d'épaisseur, par exemple, on vérifiera que des charges successives de 40, 30, 20 et 10 étincelles sont capables de fondre exactement des longueurs du même fil égales à 16, 9, 4 et 1 centimètres. Toutefois, l'expérience réussit moins bien pour les

petites longueurs, comme la dernière, parce que la résistance du fil est alors trop faible et que les pinces entre lesquelles on le maintient absorbent par conductibilité une partie notable de la chaleur qu'il reçoit.

Cuthbertson et Singer [1] ont proposé déjà la fusion du fil d'acier pour évaluer des quantités d'électricité et comparer le débit des machines électriques, mais ils croyaient que la longueur du fil fondu était proportionnelle simplement à la quantité d'électricité qui s'écoule pendant la décharge.

Guillemin [2] a employé ainsi des fils de fer ou de platine, qu'il appelle *fils d'épreuve*, pour déterminer quelle est la plus énergique de deux décharges électriques dérivées dans des conducteurs qui font partie d'un même circuit. Guillemin a remarqué, au sujet des fils de fer, une circonstance qui mérite d'être signalée. Quand un pareil fil a été fortement échauffé par une décharge presque suffisante pour le fondre, il devient alors moins fusible et résiste ensuite, quand on atteint la charge qui l'aurait fondu primitivement. La couche d'oxyde dont le fil s'est revêtu dans le premier échauffement est sans doute la cause de ce changement de propriétés. La seule précaution à prendre est donc d'opérer dans toutes les expériences avec des fils neufs, afin qu'ils soient toujours comparables entre eux.

422. **Echauffement d'un conducteur formé de plusieurs branches.** — La résistance d'un fil est la longueur λ du fil étalon de section égale à l'unité qui absorbe la même quantité de chaleur, et, d'après les lois précédentes, le même fil peut être remplacé aussi par un fil de platine de longueur égale à l'unité dont la section serait $\frac{1}{\lambda}$.

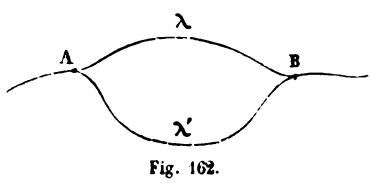


Fig. 162.

Si, entre deux points A et B de l'arc conducteur (fig. 162), se trouvent deux fils, l'un de résistance λ et l'autre de résistance λ', on pourra les remplacer par deux fils de longueur égale à l'unité, dont l'un aura

[1] *Nicholson Journal*, t. XXVI, p. 218.
[2] *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XXVII, p. 518.

pour section $\frac{1}{\lambda}$ et l'autre $\frac{1}{\lambda'}$, c'est-à-dire par un fil unique dont la section sera $\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\lambda'}$, et la résistance A de ce fil sera donnée par l'équation

$$\frac{1}{A}=\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\lambda'}.$$

On aurait, de même, pour un nombre quelconque de fils interposés entre les deux points A et B,

$$\frac{1}{A}=\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\lambda'}+\frac{1}{\lambda''}+\ldots. \qquad (1)$$

Nous trouvons dans l'ouvrage de M. Riess un certain nombre d'expériences qui vérifient cette formule.

423. M. Riess a placé d'abord entre les points A et B des fils de platine de même section et de longueurs différentes, ce qui lui a permis de déterminer les deux constantes a et b qui entrent dans l'expression (419)

$$d=\frac{a}{1+b\lambda}, \qquad (2)$$

ou λ désigne la longueur du fil intercalé que l'on peut prendre pour étalon.

Une première série d'expériences a donné :

LONGUEUR DU FIL INTERCALÉ λ	ÉCHAUFFEMENT DU THERMOMÈTRE	
	OBS.	CALC.
33[1]	0,251	0,250
100,8	0,180	0,180
194,6	0,133	0,150
290,8	0,102	0,101

Les valeurs de l'échauffement observées sont chacune la moyenne de six expériences, et les valeurs calculées ont été ob-

tenues en prenant

$$a = 0{,}308$$
$$b = 0{,}00705.$$

On peut ensuite remplacer le fil de platine par un fil quelconque et la valeur de d que l'on obtiendra permettra de calculer la conductibilité de ce fil, ou l'inverse de la résistance λ. La formule (2) donne en effet

$$\frac{1}{\lambda} = b\left(\frac{d}{a-d}\right).$$

Comme le coefficient b restera constant dans toutes les expériences, il suffira de calculer la fraction $\frac{d}{a-d}$. M. Riess a employé neuf fils différents qui ont donné les résultats suivants, quand on les disposait séparément entre les deux points A et B :

NUMÉROS DES FILS	ÉCHAUFFEMENT DU THERMOMÈTRE d	$\frac{d}{a-d}$
1 (platine)	0,205	1,99
2 »	0,255	3,22
3 »	0,096	0,453
4 »	0,170	1,232
5 »	0,205	1,99
6 »	0,129	0,721
7 (fer)	0,112	0,571
8 (Maillechort)	0,136	0,79
9 (Cuivre)	0,158	1,05

On a ensuite posé entre les mêmes points A et B deux ou trois des fils précédents et déterminé les nouvelles valeurs de d. Comme la conductibilité de l'ensemble des deux ou trois fils est, d'après la formule (1), égale à la somme des conductibilités de ces différents fils, la nouvelle valeur du rapport $\frac{d}{a-d}$ doit être égale à la somme des valeurs qui correspondent à chacun des fils séparément. Le tableau suivant montre qu'il y a un accord très-satisfaisant entre le calcul et l'observation.

N^{os} DES FILS INTERCALÉS	ÉCHAUFFEMENT DU THERMOMÈTRE d	$\frac{d}{a-d}$ OBS.	$\frac{d}{a-d}$ CALC.	EXCÈS DU CALCUL SUR L'OBSERVATION
1 et 2	0,256	4,92	5,21	+ 0,29
1 et 3	0,218	2,42	2,44	+ 0,02
1 et 4	0,236	3,28	3,22	— 0,06
1 et 5	0,245	3,89	3,98	+ 0,09
5 et 6	0,169	1,22	1,17	— 0,05
5, 6 et 7	0,198	1,80	1,74	— 0,06
1 et 8	0,225	2,71	2,78	+ 0,07
6 et 9	0,200	1,85	1,77	— 0,08

424. Décharges dérivées. — Il reste enfin à comparer les quantités de chaleur qui se dégagent sur chacun des fils interposés entre les deux mêmes points.

Soient λ et λ' les résistances des deux fils placés entre A et B (fig. 162) et λ_1 la résistance du reste du circuit qui joint les points A et B aux armatures de la batterie; q, q' et q_1 les quantités de chaleur que reçoivent ces différentes parties, et Q la chaleur totale fournie par la décharge. La résistance du fil unique équivalent à l'ensemble des deux fils λ et λ' étant

$$\frac{1}{\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\lambda'}},$$

on a

$$(3) \qquad \frac{q+q'}{\frac{1}{\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\lambda'}}} = \frac{Q}{\lambda_1+\frac{1}{\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\lambda'}}} = \frac{q_1}{\lambda_1}.$$

Pour trouver le rapport qui existe entre les deux quantités de chaleur q et q', on peut raisonner par induction de la manière suivante. Le flux électrique qui s'écoule pendant la décharge doit se partager entre les deux fils proportionnellement aux sections des fils de longueur égale à l'unité qui peuvent les remplacer, c'est-à-dire à leurs conductibilités. En appelant i et i' les deux portions du flux total qui passent dans les fils λ et λ', on doit

avoir

$$\frac{i}{i'}=\frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{\lambda'}}=\frac{\lambda'}{\lambda}.$$

D'autre part, la chaleur dégagée dans un fil étant proportionnelle au carré de la quantité d'électricité et à la résistance du fil, on peut écrire aussi la relation

$$\frac{q}{q'}=\left(\frac{i}{i'}\right)^2\frac{\lambda}{\lambda'}=\frac{\lambda'}{\lambda};$$

on en déduit

$$\frac{q}{q+q'}=\frac{\lambda'}{\lambda+\lambda'}=\frac{1}{\lambda}\frac{1}{\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\lambda'}}.$$

En remplaçant la somme $q+q'$ par sa valeur tirée de l'équation (3), il vient

$$q=Q\frac{1}{\lambda}\frac{1}{\left(\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\lambda'}\right)^2}\frac{1}{\lambda_1+\frac{1}{\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\lambda'}}}.$$

Pour vérifier cette formule d'une manière simple, on peut remarquer que si, le fil λ renfermant le thermomètre électrique, on fait varier seulement le fil λ' dans différentes expériences, et si la résistance λ' de ce fil est petite par rapport à la résistance λ_1 du circuit, le facteur

$$\lambda_1+\frac{1}{\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\lambda'}}=\lambda_1+\frac{\lambda'}{1+\frac{\lambda'}{\lambda}}$$

pourra être considéré comme sensiblement constant; l'échauffement du thermomètre sera alors en raison inverse de $\left(\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\lambda'}\right)^2$. On peut donc écrire, en désignant par a et b deux constantes,

$$d=\frac{a}{\left(b+\frac{1}{\lambda'}\right)^2}.$$

425. Dans l'une des séries d'expériences de M. Riess, la résistance λ' a été formée successivement par quelques-uns des fils déjà employés, et les résultats ont été les suivants. On a pris ici pour les conductibilités $\frac{1}{\lambda'}$ les valeurs des fractions $\left(\frac{d}{a-d}\right)$ tirées des tableaux précédents et qui sont proportionnelles à ces conductibilités.

NUMÉRO DU FIL	CONDUCTIBILITÉ $\frac{1}{\lambda'}$	ÉCHAUFFEMENT DU THERMOMÈTRE	
		OBS.	CALC.
3	0,453	0,132	»
5	1,99	0,062	»
8	0,79	0,102	0,109
2	3,22	0,039	0,040
4	1,232	0,081	0,087

Le calcul de l'échauffement dans les trois dernières expériences a été fait en prenant pour a et b les valeurs

$$a = 1,485,$$
$$b = 2,90,$$

que l'on déduit des deux premières; la comparaison est encore tout à fait satisfaisante. M. Knochenhauer (1) a repris cette étude des décharges dérivées, mais les formules auxquelles il arrive paraissent un peu en désaccord avec les précédentes.

426. Il resterait maintenant à rendre compte par la théorie de la manière dont l'énergie électrique, ou la chaleur totale, se distribue dans les différentes parties du conducteur par lequel s'effectue la décharge d'un corps électrisé. Comme cette question est identique à celle qui se présente pour les courants électriques, nous reprendrons cette démonstration à propos de l'étude des courants. Les expériences de M. Riess peuvent être résumées par ce simple énoncé, que la quantité de chaleur qui se dégage dans un fil situé sur le trajet de la décharge est proportionnelle au carré de la quantité d'électricité et à la résistance du fil. C'est identiquement la loi établie plus tard par

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XVII, p. 105.

M. Joule pour les courants électriques. D'ailleurs, la décharge d'un corps électrisé diffère uniquement d'un courant électrique ordinaire par cette circonstance qu'elle se produit pendant un temps extrêmement court, tandis qu'un courant ordinaire est permanent. Dans les deux cas, il s'écoule d'un point à un autre une certaine quantité d'électricité, et il est naturel que le dégagement de chaleur suive les mêmes lois.

427. **Influence du milieu mauvais conducteur que traverse l'étincelle pendant la décharge.** — Dans tout ce qui précède, on a supposé que la quantité d'électricité qui s'écoule pendant la décharge est proportionnelle à la charge de la batterie elle-même, et nous avons vu (400) que l'expérience justifie ce point au moins d'une manière approchée, tant que le trajet que parcourt la décharge est métallique. En interposant dans le circuit des corps très-résistants, tels qu'une colonne liquide, on peut exagérer beaucoup le résidu, comme l'a constaté M. Riess [1], surtout si l'on produit l'explosion à distance, au lieu d'amener les armatures en contact. On a fait encore implicitement une autre hypothèse, c'est que la quantité de chaleur qui provient de la décharge se répand en totalité sur l'arc conducteur qui joint les deux armatures de la batterie, ou du moins que la quantité de chaleur prise par cet arc est proportionnelle à la chaleur totale pour différentes charges de la batterie. Cette proposition n'est pas évidente, car en même temps que l'électricité traverse l'arc conducteur, il se produit une étincelle entre les branches de l'excitateur, et une fraction de l'énergie totale est absorbée dans le travail mécanique accompli par l'étincelle.

428. Pour apprécier cette influence, M. Riess fit communiquer d'abord les deux branches de l'excitateur avec deux disques de laiton isolés de 3/4 de ligne d'épaisseur et de 10',4 de diamètre. Ces disques ont été maintenus à des distances variables dans plusieurs séries d'expériences successives, et les décharges étaient provoquées en fermant une interruption ménagée en un autre point du circuit. Le tableau suivant indique, pour les différents cas, l'échauffement du thermomètre calculé pour une bouteille et une étincelle par la formule ordinaire (414).

[1] *Reibungselektricität*, Bd II, p. 88.

NOMBRE DES BOUTEILLES n	NOMBRE D'ÉTINCELLES M	DISTANCE DES DISQUES.		
		NULLE	0l,1	1l,0
3	3	1,60	1,57	1,77
»	4	1,44	1,31	1,31
»	5	1,32	1,31	1,24
»	6	1,30	1,21	1,14
4	4	1,50	1,50	1,82
»	5	1,37	1,37	1,49
»	6	1,35	1,32	1,33
»	7	1,28	1,27	1,20
5	5	1,52	1,14	»
»	6	1,43	1,40	1,49
»	7	1,32	1,25	1,33
»	8	1,33	1,27	1,25

Présenté sous cette forme, le tableau montre d'abord que les expériences d'une même série ne satisfont pas bien à la loi des décharges, et il est difficile d'apprécier ce qui tient aux erreurs expérimentales et ce qui est dû au changement de distance des disques. Toutefois, les nombres de la seconde colonne diffèrent assez peu des nombres correspondants de la première, et les différences sont assez irrégulières, pour que l'on puisse considérer comme négligeable l'effet produit par un écartement des disques d'un dixième de ligne. Les nombres de la troisième colonne paraissent, dans chaque série, d'abord plus grands, puis plus petits que ceux de la première. Cette circonstance indique que les causes d'altération sont multiples. En effet, à mesure qu'on écarte les disques, le résidu de la batterie augmente, ce qui tend à diminuer l'échauffement du thermomètre; mais, d'autre part, l'intensité de l'étincelle sur l'appareil de décharge diminue, parce que cette étincelle ne peut plus se produire à une aussi grande distance, et qu'elle absorbe alors une quantité d'énergie plus faible. Quand on augmentera la distance d'interruption, l'effet thermométrique de la décharge pourra donc, suivant les cas, augmenter ou diminuer.

429. M. Riess a répété la même expérience en remplaçant les disques par deux boules de laiton, l'une de 5l,7 de diamètre,

l'autre de 4',4, qu'il a mises d'abord en contact, puis à la distance d'une ligne. Le tableau suivant donne encore la valeur de la constante a (414) déduite de chaque expérience.

NOMBRE DES BOUTEILLES n	NOMBRE D'ÉTINCELLES M	DISTANCE DES BOULES	
		NULLE	UNE LIGNE
3	3	1,67	Pas de décharge.
»	4	1,44	1,86
»	5	1,36	1,20
»	6	1,33	1,19
4	4	1,52	Pas de décharge.
»	5	1,41	1,41
»	6	1,39	1,26
»	7	1,25	1,21
5	5	1,40	Pas de décharge.
»	6	1,36	Id.
»	7	1,28	1,26
»	8	1,20	1,20

La décharge n'a pas lieu lorsque la distance des boules est supérieure à la distance explosive de la batterie; pour la distance d'une ligne, la densité moyenne $\frac{M}{n}$ de la batterie doit être ici au moins égale à 1,33. Quant à l'influence de l'écartement des boules, on voit bien que, sauf en un cas, elle a eu pour effet de diminuer l'échauffement du thermomètre, mais les expériences ne sont pas assez concordantes entre elles pour que l'on puisse rien préciser à ce point de vue.

M. Riess a encore remplacé les boules par des pointes, et il a constaté que, lorsque les pointes sont éloignées de 4 lignes, l'échauffement du thermomètre est beaucoup moindre que si elles étaient au contact, ce qui s'explique en partie par l'accroissement de résidu de la batterie.

Toutefois, il paraît résulter de l'ensemble de ces expériences, qu'un écartement de 0',2 entre des disques ou des boules n'influe pas d'une manière appréciable sur la quantité de chaleur dégagée dans le thermomètre.

430. L'interruption entre les branches de l'excitateur étant ainsi de 0^{l},2, M. Riess y a interposé différents corps solides. On voit dans le tableau suivant que le travail dépensé par l'étincelle, pour contourner ou traverser ces obstacles, est accusé par un échauffement moindre du thermomètre. Le nombre rapporté pour chaque expérience est encore l'échauffement calculé pour une bouteille et une étincelle.

SUBSTANCES INTERPOSÉES	INTERRUPTION FORMÉE PAR			
	LES DISQUES		LES BOULES	LES POINTES
	$n = 5$ $M = 6$	$n = 5$ $M = 8$	$n = 5$ $M = 8$	$n = 5$ $M = 8$
Lame d'air.	1,53	1,24	1,20	1,18
Une feuille de carton. .	0,90	0,91	0,94	0,90
Deux feuilles de carton séparées par une feuille d'étain. . . .	»	0,75	0,73	»
Deux feuilles de carton.	0,58	0,62	0,69	0,81
Une lame de mica. . .	pas de décharge.	0,53	0,36	0,49 à 0,25

L'influence du milieu interposé ressort clairement de la comparaison de ces expériences; les résultats relatifs à la lame de mica étaient assez discordants, surtout avec les pointes, mais cette lame interposée n'était jamais percée en face de la pointe, et M. Riess a reconnu que l'échauffement du thermomètre était d'autant plus faible que le chemin parcouru par l'étincelle le long de la surface du mica était plus grand. Un autre fait à signaler, c'est que deux feuilles de carton séparées par une feuille d'étain ont eu un effet moindre que les deux feuilles de carton seules; ce résultat assez inattendu peut tenir à ce que le travail dépensé par l'étincelle dépend, non pas seulement de l'épaisseur du milieu traversé, mais de la manière dont la perforation a lieu. Enfin, on voit aussi qu'à cette distance de 0^{l},2, la forme des conducteurs entre lesquels l'interruption est produite n'a pas d'influence appréciable.

431. Je citerai encore quelques expériences pour lesquelles

j'ai ménagé dans le circuit de la décharge une interruption formée par deux boules ou deux pointes plongées dans l'essence de térébenthine. La batterie et la quantité d'électricité sont restées les mêmes dans tous les cas, et l'échauffement de l'arc était évalué par un thermomètre inscripteur.

DISTANCE DE L'INTERRUPTION	ÉCHAUFFEMENT QUAND L'INTERRUPTION A LIEU	
	ENTRE BOULES	ENTRE POINTES
0mm	20	20
1	21,5	»
3	23	»
5	20	21
8	17	20
11	13	14
16	Pas de décharge.	11

On voit qu'ici encore, l'échauffement du thermomètre croît d'abord quand on augmente l'épaisseur de la couche d'essence traversée par l'étincelle, pour diminuer ensuite d'une manière plus rapide.

En résumé, la quantité de chaleur dégagée dans un circuit conducteur par une décharge électrique est plus faible lorsque l'étincelle doit vaincre un obstacle formé par un corps mauvais conducteur; mais, d'autre part, le travail absorbé par l'étincelle est une quantité assez mal définie, et si l'on veut se mettre à l'abri de cette cause d'erreur dans les expériences thermométriques, il faut réduire l'intensité de l'étincelle en augmentant suffisamment les résistances sur l'arc de communication. Avec cette précaution, le thermomètre électrique peut donner des résultats très-réguliers.

432. **Expériences relatives à l'échauffement des conducteurs.** — Les lois établies précédemment permettent maintenant de préciser le partage de la chaleur dans les décharges électriques, surtout quand la résistance de l'arc conducteur est assez grande pour que le travail dépensé par l'étincelle soit très-faible et que la presque totalité de l'énergie soit employée à échauffer les différentes parties du circuit.

Si l'arc par lequel on réunit un corps électrisé avec le sol, ou deux armatures d'une batterie entre elles, est formé de deux parties dont les résistances sont L et λ, la quantité de chaleur q qui se dégagera dans le fil de résistance λ a pour expression, en appelant Q la chaleur totale (416),

$$q = Q\frac{\lambda}{L+\lambda}.$$

Supposons que le conducteur de résistance λ soit un cylindre dont la longueur est l, s la section, c le coefficient de conductibilité, p le poids, C la chaleur spécifique, et d la densité ; appelons T l'élévation de température, en supposant qu'il n'y ait aucune perte de chaleur pendant la période d'échauffement, on aura

$$\lambda = \frac{l}{cs},$$

$$p = lsd,$$

$$q = pCT = lsdCT = Q\frac{l}{Lcs+l}.$$

On en déduit

$$T = \frac{Q}{Csd}\cdot\frac{1}{Lcs+l}.$$

Cette formule indique immédiatement quelles sont les différentes circonstances qui influent sur l'élévation de température.

Si l'on fait en sorte que la partie constante de l'arc conducteur L ait une résistance négligeable, ce qui est le cas habituel, il reste simplement

$$(1) \qquad T = \frac{Q}{Csdl}.$$

Dans ce cas, *l'élévation de température est en raison inverse de la chaleur spécifique du fil, de sa section, de sa densité et de sa longueur*. Elle est d'ailleurs proportionnelle à l'énergie électrique, c'est-à-dire au produit de la quantité d'électricité par la différence des potentiels des deux corps entre lesquels se produit la décharge.

433. **Fusion et volatilisation de fils de métal.** — On voit par cette formule qu'en choisissant d'une manière convenable les

conditions de l'expérience, on pourra, à l'aide d'une décharge électrique, élever la température d'un métal quelconque au point de le fondre ou même de le réduire en vapeurs.

Ces expériences, d'ailleurs très-anciennes, sont devenues classiques; on emploie habituellement, pour les répéter, l'excitateur universel de Henley. Entre les deux branches de cet appareil on tend un fil métallique F (fig. 163) que l'on fait traverser par

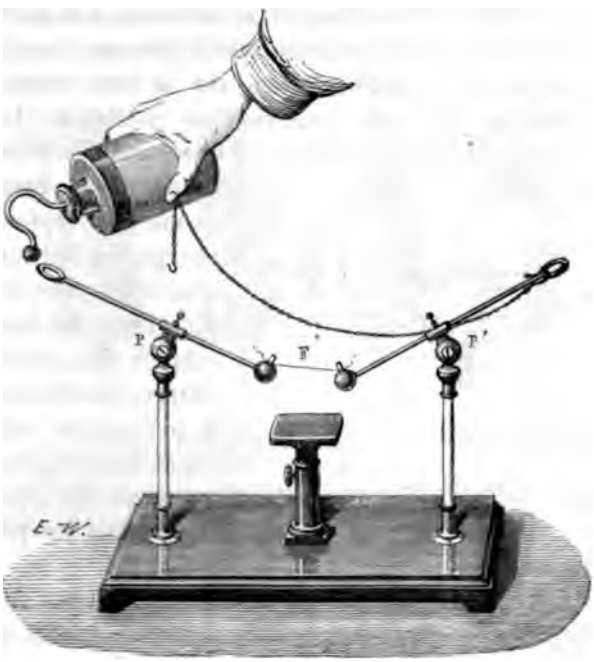


Fig. 163.

la décharge d'une bouteille de Leyde, comme l'indique la figure; l'échauffement est d'autant plus grand que le fil est plus fin et plus court. Un fil de fer peut être transformé en gouttelettes qui sont formées presque exclusivement d'oxyde de fer. Les cordons à filet d'or, d'argent ou de cuivre conviennent très-bien pour cette expérience; il se dégage du fil, au moment de l'explosion, une fumée due aux vapeurs métalliques qui se condensent rapidement, et le métal disparaît complétement.

On peut recueillir, au moins en partie, ces poussières métalliques en appliquant contre le fil une feuille de papier blanc (fig. 164); il s'y forme une couche brune plus ou moins abondante dont la teinte dépend de la nature du métal employé.

Si l'on veut produire cet effet plus en grand, on remplace la bouteille de Leyde par une batterie électrique. On prend, par exemple, une planchette couverte d'une feuille de papier et sur laquelle on tend parallèlement entre eux des fils métalliques différents, de platine, d'or, d'argent ou de cuivre. Ces fils sont attachés, d'une part, à une bande de métal fixée sur l'un des bords de la planchette et, d'autre part, sur le bord opposé, à des boules plantées dans une lame isolante en ébonite. On maintient la bande de métal en communication avec l'armature extérieure de la batterie et, quand cet appareil est chargé, on fait communiquer l'armature intérieure avec l'une des boules. On volatise ainsi, à chaque décharge, l'un des métaux, et le phénomène est accompagné d'une explosion plus ou moins violente. On reconnaît facilement que les vapeurs métalliques ont des couleurs très-distinctes et que les poussières ont aussi des teintes différentes.

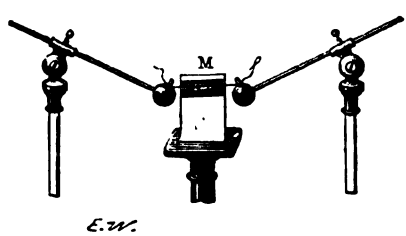


Fig. 164.

434. Comme les batteries ordinaires ne peuvent supporter, sans danger de rupture, qu'une différence de potentiel assez faible entre les armatures, on ne peut augmenter l'énergie électrique d'une batterie qu'en multipliant les bouteilles; mais le débit des machines ordinaires est limité, le temps nécessaire pour charger la batterie jusqu'à refus est souvent très-long, et il peut même arriver que les fuites d'électricité ne permettent pas d'atteindre la charge maximum. D'autre part, le potentiel maximum des machines est généralement de beaucoup supérieur à celui que l'on peut établir sur la batterie et l'on peut profiter de cet avantage en disposant les batteries en cascade.

Supposons, par exemple, qu'on emploie la machine de Holtz et quatre batteries de 6 grandes jarres. On isole ces batteries

sur des tabourets à pieds de verre et on les dispose en cascade, comme le sont les quatre bouteilles de la fig. 165; on réunit séparément, par des tringles R et R′, les deux pôles de la machine avec les armatures intérieures A et E des batteries extrêmes, et l'on place le fil qu'on veut volatiliser sur le trajet d'une de ces communications. Ce fil est traversé lentement par l'électricité pendant que les batteries se chargent et ne s'échauffe pas d'une manière sensible. Les armatures extrêmes peuvent prendre alors une différence de potentiel 4 fois plus grande que s'il n'y avait, avec la même quantité d'électricité, qu'une seule batterie, ce qui

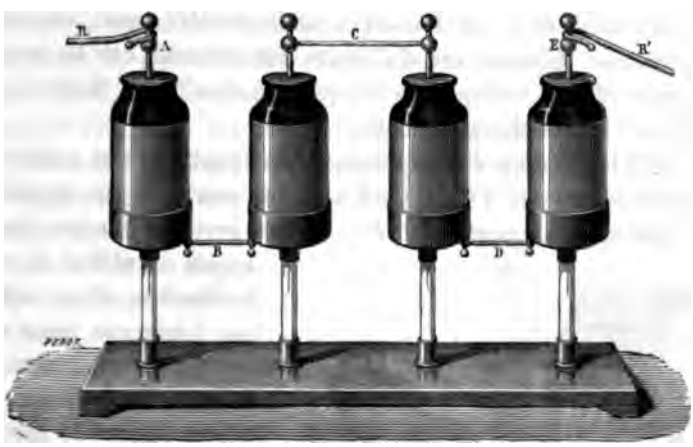


Fig. 165.

correspond à une énergie électrique 4 fois plus grande. Quand la charge est suffisante, on ferme la machine, le fil est traversé par la décharge. On peut ainsi volatiliser, avec une détonation pareille à un coup de pistolet, un fil de laiton de plus de 50 centimètres de longueur et de $\frac{1}{5}$ de millimètre de diamètre.

L'expérience est très-remarquable avec le fer. La volatilisation du métal est très-faible, mais quand la température est suffisante, le fil est fondu violemment et projeté en tous sens sous forme de gouttelettes brillantes qui brûlent comme les étincelles que donne le fer forgé. La disposition qui précède permet de fondre aisément plus de 80 centimètres d'un fil de fer ayant $\frac{1}{3}$ de millimètre de diamètre.

435. **Expérience de la presse électrique.** — Franklin (1) paraît avoir observé pour la première fois la fusion et la volatilisation des métaux par l'étincelle électrique. Il fait passer la décharge d'une bouteille de Leyde par les filets dorés d'une reliure, et la dorure avait complétement disparu après la production de l'étincelle. Il suffisait d'ailleurs de placer une feuille de papier blanc au-dessus du filet d'or pour obtenir une traînée noire due à la condensation des vapeurs métalliques. Franklin a remarqué aussi que, si l'on volatilise ainsi une feuille d'or battu comprise entre deux lames de verre, le métal laisse sur le verre des empreintes qui ne peuvent plus être enlevées même par l'eau régale; il semble donc que l'or ait en partie pénétré dans l'intérieur du verre. La secousse est d'ailleurs très-violente, car les lames de verres étaient quelquefois brisées; ce résultat est facile à obtenir avec une décharge de batterie.

C'est à l'imitation des expériences de Franklin et en souvenir de ses travaux sur l'électricité qu'a été construit un appareil classique appelé le *portrait de Franklin* ou *presse électrique*, dans lequel on utilise la volatilisation d'un métal par l'étincelle pour reproduire un dessin. L'appareil se compose d'une feuille de carton mince B (figure 166), dans lequel on a dessiné à jour un tracé quelconque, habituellement une figure représentant le portrait de Franklin. Ce carton porte quatre prolongements latéraux dont deux F et F′ sont formés de feuilles d'étain et deux autres A et C aussi en carton peuvent se rabattre sur la partie moyenne. On applique sur cette figure une feuille d'or assez large pour qu'elle empiète sur les deux lames d'étain, on rabat les deux bouts A et C de façon à emprisonner la feuille d'or, et on met en dessous un morceau de soie blanche ou simplement du papier blanc. Le

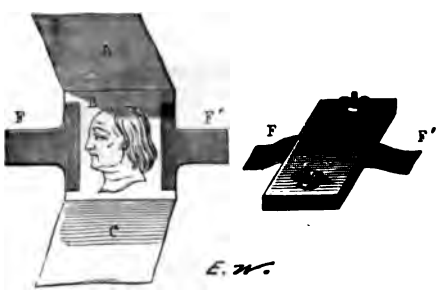


Fig. 166.

(1) *Lettres sur l'électricité.* Opinions et conjectures, etc. (1749).

tout est ensuite fortement serré entre deux planchettes P pour que le carton découpé s'applique exactement sur la feuille qui doit recevoir l'empreinte. Enfin on relie l'une des feuilles d'étain avec l'une des armatures d'une forte bouteille ou d'une batterie et on approche l'autre armature de la deuxième feuille d'étain. Quand la décharge a lieu, la feuille d'or se volatilise, la vapeur traverse les vides du carton découpé et reproduit le dessin en noir sur la soie ou le papier blanc.

436. **Torpille électrique.** — Le bruit qui accompagne la volatilisation brusque d'un fil métallique indique que les vapeurs exercent sur l'air une pression très-énergique. Si l'on produit le même phénomène dans les liquides, qui sont très-peu compressibles, le choc se transmettra aux parois du vase et pourra le briser. Pour cela, il suffit de plonger dans un verre qui renferme de l'eau les deux branches de l'excitateur reliées par un fil de platine fin et court. Au moment où l'on fait traverser ce fil par la décharge d'une batterie, l'eau est projetée à quelques centimètres de hauteur, le vase tombe en morceaux et les fragments sont sillonnés de fentes nombreuses disposées en éventail. Cette expérience est assez ancienne; on faisait autrefois éclater un canon de pistolet par la volatilisation d'un fil de métal plongé dans l'eau; Guillemin [1] a donc pu comparer la secousse ainsi produite à celle d'une torpille de guerre.

VITESSE DE PROPAGATION DE L'ÉLECTRICITÉ.

437. La communication des propriétés électriques d'une extrémité à l'autre d'un conducteur ne peut pas être absolument instantanée, mais on fut longtemps avant de pouvoir mettre en évidence la durée de ce phénomène. Plusieurs physiciens tentèrent de résoudre cette question, surtout à l'époque de la découverte de la bouteille de Leyde; mais, quelle que fût la longueur du circuit interposé entre les deux armatures (près de deux mille toises d'un fil de fer, par exemple, dans des expé-

[1] *Journal de Physique*, t. I, p. 229.

riences de Le Monnier (1), ou même un circuit formé par un fil métallique de deux milles anglais de longueur et une distance égale par le sol, comme dans les expériences dirigées par Watson (2) à Londres), deux observateurs placés en deux points quelconques du circuit éprouvèrent toujours la secousse électrique au même moment, et les étincelles produites en deux points d'interruption parurent toujours simultanées.

La durée du phénomène est plus facile à mettre en évidence à l'aide de corps notablement moins conducteurs que des fils métalliques.

Ainsi Beccaria, que nous avons déjà cité (7), s'est certainement trompé en évaluant à une demi-seconde la durée de la décharge dans un fil de fer de 500 pieds de longueur, mais il a constaté qu'avec une corde de chanvre le phénomène pouvait durer plusieurs secondes. Ce ralentissement de la décharge par les conducteurs médiocres a été mis à profit par Faraday (330) pour l'emploi du galvanomètre; il résulte aussi des expériences de Weber (331) que la durée de la décharge d'une batterie dont les armatures sont réunies par une corde de chanvre est, au moins comme première approximation, en raison inverse de la longueur de la corde, c'est-à-dire proportionnelle à la résistance du circuit. M. Riess considère cette relation comme générale, mais nous verrons, dans l'étude de l'étincelle, que la question est moins simple.

438. **Diagomètre de Rousseau.** — Comme la propagation de l'électricité est extrêmement lente dans certains liquides et peut être considérablement modifiée par l'addition d'une très-faible quantité d'un liquide étranger, Rousseau eut l'idée de construire un instrument qu'il appela *diagomètre* (3), et qu'il proposa pour contrôler le degré de pureté des huiles d'olive en particulier. Cet instrument (fig. 167) se compose d'une aiguille aimantée très-légère *ab*, terminée à l'une de ses extrémités par un petit disque *a*, et reposant par une chape en métal sur une pointe métallique; cette pointe communique avec une lame verticale A et un plateau D. Ces organes sont parfaitement isolés dans un gâteau de résine, et

(1) *Mémoire de l'Académie des sciences* (1746) p. 456.
(2) *Phil. trans. abridged*, vol. IX, p. 440 (1747).
(3) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXV, p. 373.

l'aiguille est recouverte d'une cloche portant des divisions. D'autre part, une pile sèche (270) formée de doubles disques de zinc et de clinquant collés par un mélange d'huile de pavot et d'essence de térébenthine en parties égales, est fixée au pied de l'instrument. Un des pôles N communique avec le sol, l'autre pôle P communique par un fil avec une tige T, bien isolée, que l'on peut élever ou abaisser à l'aide d'un bouton B à crémaillère.

L'appareil est disposé de façon que, l'aiguille étant à l'état neutre, le disque *a* soit très-rapproché de la lame fixe A et la pointe *b* en face du zéro de la graduation; on observe alors la déviation que prend l'aiguille quand on la fait communiquer avec le pôle isolé P de la pile, en descendant, par exemple, la tige T jusqu'au contact du plateau D. On ramène alors l'aiguille à l'état neutre, on pose sur le plateau une coupe en métal C qui est remplie du liquide à étudier, on abaisse la tige T jusqu'au contact du liquide et on observe le temps nécessaire pour que l'aiguille aimantée atteigne sa déviation maximum, la même que si la communication eût été établie par un conducteur métallique.

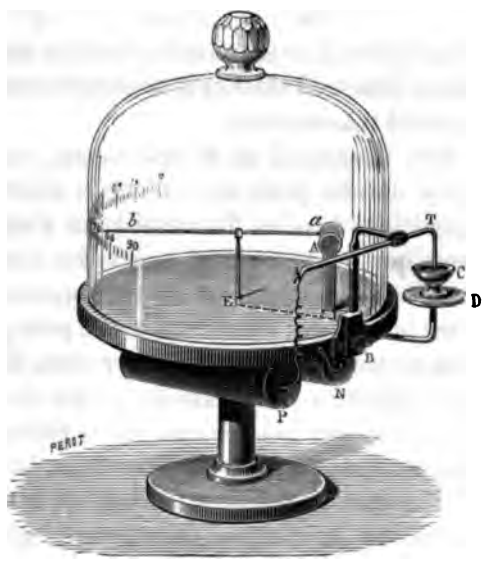


Fig. 167.

Ainsi, le temps nécessaire pour obtenir la déviation définitive étant, par exemple, de 40 minutes avec de l'huile d'olive pure, il n'était que de 27 secondes pour l'huile de pavot ou l'huile de faîne; l'addition d'un centième seulement de l'une de ces dernières à l'huile d'olive suffisait pour abaisser à 20 minutes le temps nécessaire à la déviation finale.

Ces expériences conduisent d'ailleurs à une relation remar-

quable. Si l'on admet que la conductibilité du liquide soit en raison inverse de la durée du phénomène, et que la conductibilité d'un mélange soit la moyenne des conductibilités des liquides mélangés, le temps t nécessaire pour atteindre la déviation finale, dans le cas d'une addition d'un centième d'huile de pavot à l'huile d'olive, sera donné par l'équation

$$\frac{1}{t} = \frac{99}{100} \cdot \frac{1}{40} + \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{\frac{27}{60}};$$

on en déduit $t = 21$ minutes, au lieu de 20 que donne l'observation directe. Toutefois il ne semble pas que cet appareil ait jamais été très-employé.

439. **Expérience de M. Wheatstone.** — Les tentatives faites au siècle dernier pour déterminer la durée de la propagation de l'électricité dans les fils métalliques n'ont donné aucun résultat parce que les procédés d'observation étaient insuffisants. La secousse physiologique est un phénomène dont il est difficile de noter le moment exact, et l'œil ne peut guère apprécier l'intervalle de temps qui s'écoule entre deux étincelles si cet intervalle est inférieur à $\frac{1}{10}$ de seconde, ce qui correspond à peu près à la persistance des impressions sur la rétine. M. Wheatstone [1] fut plus heureux et, après plusieurs tentatives infructueuses, il réussit à mettre en évidence la durée de la décharge et de la propagation par la méthode des miroirs tournants, qui a depuis été appliquée par Foucault avec tant de succès à la détermination de la vitesse de la lumière.

Le principe de la méthode imaginée par M. Wheatstone consiste à interrompre l'arc conducteur traversé par la décharge en plusieurs points, de manière à obtenir plusieurs étincelles que l'on observe par réflexion dans un miroir animé d'une vitesse de rotation très-considérable. Si l'électricité met un temps appréciable pour parcourir la portion du fil comprise entre deux solutions de continuité successives, les deux étincelles ne seront pas simultanées; le miroir aura pu parcourir pendant l'in-

[1] *Phil. trans.* (1834), p. 583.

tervalle de temps qui les sépare un angle appréciable, et les deux images ne paraîtront pas à la même distance que si le miroir eût été immobile ou les étincelles simultanées. Comme l'observateur ne pouvait pas viser autour du miroir dans toutes les directions, il fallait, de plus, que les différentes étincelles fussent assez voisines pour être aperçues du même point par réflexion dans le miroir, et que le phénomène se produisît juste au moment où le miroir était dans une telle position que la lumière réfléchie fût dirigée vers l'observateur. La disposition de l'appareil était la suivante :

Six boules de métal (fig. 168) étaient disposées suivant une même horizontale et rapprochées en trois groupes de deux boules équidistantes. Un arc conducteur partant de l'armature extérieure

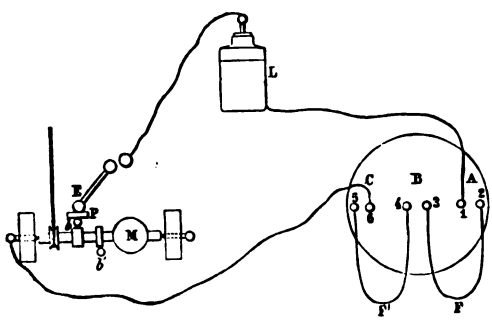


Fig. 168.

une bouteille de Leyde L se rendait au système de boules où il était interrompu trois fois, en A, B et C, et retournait ensuite à l'armature intérieure en passant par un excitateur d'une forme particulière E relié au miroir tournant. Les deux boules de chaque groupe 1 et 2, 3 et 4, étaient séparées par un intervalle de $\frac{1}{10}$ de pouce ou $2^{mm},5$ et deux boules de deux groupes voisins, 2 et 3, 4 et 5, étaient réunies par des conducteurs de grande résistance F et F'. Chacun de ces conducteurs était formé d'un fil de cuivre de $\frac{1}{15}$ de pouce de diamètre ($1^{mm},7$) disposé suivant 10 lignes parallèles de 120 pieds de longueur distantes de 6 pouces ; la longueur était donc de 365 mètres.

Le miroir M, formé d'un disque d'acier poli d'un pouce de diamètre, était porté par un axe de rotation mis en mouvement par

l'intermédiaire d'une corde et d'une poulie; cet axe était muni de deux boules excentriques, dont l'une *b* provoquait l'étincelle au moment voulu en passant dans le voisinage d'une plaque conductrice P, et dont l'autre *b'* servait de contre-poids. L'axe de rotation était mis en communication avec l'appareil à boules, par un fil conducteur; la plaque P touchait un conducteur E dont la communication avec l'armature intérieure de la bouteille était encore interrompue par un petit intervalle. Cette bouteille était d'ailleurs reliée à une machine électrique marchant d'une manière continue, et l'on obtenait ainsi une succession d'étincelles.

Pour déterminer la vitesse de rotation du miroir, M. Wheatstone avait d'abord adapté une syrène à l'axe tournant, mais le son était toujours trop aigu pour être évalué avec précision, et l'expérience montra qu'en adaptant un morceau de papier à la boule *b*, les chocs de ce papier à chaque rotation sur la plaque voisine suffisaient à produire un son très-pur dont la tonalité fut facile à déterminer. La vitesse de rotation a atteint, dans ces expériences, jusqu'à 800 tours par seconde.

440. Les images dans le miroir des trois étincelles A,B et C, qui sont des points situés sur une même horizontale quand le miroir est immobile ou tourne très-lentement, paraissent au contraire trois bandes verticales (fig. 169 et 170) allongées lorsque la rotation est très-rapide. Ces trois bandes sont d'égales longueurs, mais elles ne commencent pas au même instant : celle du milieu B est située un peu plus haut ou plus bas que les deux autres, suivant le sens de rotation du miroir, et sa position indique qu'elle est toujours en retard. Il résulte de là deux conséquences importantes : d'abord l'étincelle elle-même dure un certain temps puisque l'image n'est pas un point, et, en second lieu, l'électricité met un temps appréciable à parcourir l'arc compris entre deux étincelles.

Le plus grand allongement de l'image observé a été une bande qui était vue du miroir sous un angle d'environ 24°. Cet angle est le double de la rotation du miroir pendant la durée de la décharge. En effet, soit M et M' (fig. 171) les positions du miroir au commencement et à la fin de l'étincelle placée en S, α la rotation du miroir, S' et S'' les images des extrémités de la bande lumineuse, et i l'angle du rayon incident SO avec le miroir M dans sa

première position. On a, d'après les lois de la réflexion de la lumière,

$$S'OP = POS = i,$$
$$S''OP' = P'OS = i - \alpha;$$

on en déduit

$$S'OS'' = S'OP' - S''OP' = S'OP + \alpha - S''OP' = 2\alpha.$$

L'angle des extrémités de l'image étant de 24°, la rotation du miroir avait été pendant ce temps de 12°, ce qui, à raison de

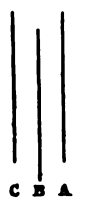


Fig. 169.

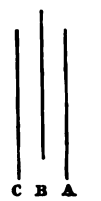


Fig. 170.

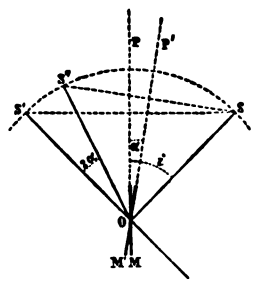


Fig. 171.

800 tours par seconde, correspond à un intervalle de temps égal à $\frac{12}{360 \times 800} = \frac{1}{24000}$ de seconde, ou environ 42 millionièmes.

Dans ce cas, l'image intermédiaire était en retard sur les deux autres d'un demi-degré, ce qui correspondait à une rotation de $\frac{1}{4}$ de degré ou à une durée de $\frac{1}{4 \times 360 \times 800} = \frac{1}{1152000}$ de seconde. Si l'on admet que l'électricité a cheminé dans un sens déterminé et d'un mouvement uniforme d'un bout à l'autre du fil AB, la vitesse de propagation a dû être de 365×1152000 mètres, c'est-à-dire environ 420 kilomètres. La vitesse serait moitié moindre si l'on admettait, au contraire, que les deux fluides se soient rejoints au milieu du fil en faisant chacun la moitié du chemin. On voit, de toutes façons, que la propagation de l'électricité dans un fil conducteur est un phénomène comparable à la propagation de la lumière dans le vide, laquelle est sensiblement de 300 000 kilomètres à la seconde.

Un des résultats les plus importants à noter dans les expé-

riences de M. Wheatstone, c'est que les deux étincelles extrêmes A et C se produisent au même instant, comme si rien ne distinguait l'une de l'autre les deux armatures de la bouteille de Leyde. L'explication de cette coïncidence est toute naturelle dans l'hypothèse des deux fluides, chacun d'eux s'éloignant de l'armature correspondante et avec la même vitesse ; mais, dans l'hypothèse d'un seul fluide, il paraît difficile de comprendre que les étincelles extrêmes soient simultanées.

Toutefois M. Wheatstone ne pensait pas avoir épuisé la question et il laissait encore à déterminer comment la vitesse de propagation de l'électricité, ainsi que la durée de l'étincelle, varient avec la nature du circuit conducteur et la tension de la source. Il avait constaté déjà que les étincelles de la grande machine magnétique de Saxton donnaient dans le miroir une image très-allongée, même pour une faible vitesse de rotation.

441. **Expériences de Faraday.** — Peu de temps après cette expérience mémorable, Faraday écrivait : « La vitesse de la décharge, *dans un même fil métallique*, peut varier beaucoup, par suite des mêmes circonstances qui font varier cette vitesse dans le blanc de baleine et dans le soufre. Par exemple, elle doit varier avec la tension ou l'intensité de la première force impulsive. Ainsi, si les deux extrémités du fil métallique de M. Wheatstone étaient en communication immédiate avec deux grandes surfaces métalliques isolées,.... je me hasarde à présumer que le retard de l'étincelle moyenne sur les étincelles extrêmes deviendrait plus sensible. Il serait encore plus considérable, si les deux surfaces dont il s'agit étaient l'armature interne et l'armature externe d'une grande bouteille de Leyde (1). »

Cette conjecture ne s'applique peut-être pas d'une manière exacte à la décharge des batteries, mais elle s'est confirmée de la manière la plus remarquable dans les recherches faites depuis sur la propagation des courants électriques, auquel cas l'idée énoncée par Faraday se présente pour ainsi dire comme une conséquence nécessaire. Considérons, en effet, une source électrique à potentiel constant, comme l'un des pôles d'une pile dont l'autre pôle est relié avec le sol, puis un fil isolé

(1) *Experimental Researches*, t. I. p. 425.

d'une longueur considérable, dont l'une des extrémités A pourra être mise en communication avec la pile, et dont l'autre extrémité B s'arrête à une très-petite distance d'un conducteur non isolé, de manière que le potentiel de la pile y puisse produire une étincelle. La capacité électrique d'un pareil fil peut être énorme, comme nous en verrons bientôt un exemple. Le débit de la source étant limité, si le fil, d'abord à l'état neutre, est mis en communication avec la pile par l'extrémité A, il se chargera nécessairement peu à peu et n'atteindra qu'au bout d'un certain temps le potentiel suffisant pour provoquer une étincelle à l'autre extrémité. Cet intervalle de temps doit être d'autant plus grand que la capacité du fil et la distance explosive seront elles-mêmes plus considérables. En particulier, ce temps doit augmenter si le fil est entouré d'une couche isolante de gutta-percha et plongé dans l'eau, ce qui en fait un condensateur. La vitesse que l'on déduira d'expériences de cette nature ne peut donc avoir une valeur unique, comme pour la propagation du son ou de la lumière. Il en sera de même si l'on a recours à un effet mécanique quelconque, autre que la formation d'une étincelle, pour apprécier l'afflux d'électricité à l'extrémité du conducteur ; enfin, les résultats seront analogues, sinon identiques, lorsque l'extrémité du fil communiquera avec le sol et qu'on se servira d'un galvanomètre pour dénoter le passage du courant.

442. Faraday a fait à ce sujet quelques expériences remarquables [1]. Il a suspendu deux cents bobines de fil de cuivre, recouvert de gutta-percha, à une série de barques rangées dans un canal, de façon que chaque bobine fût entièrement plongée dans l'eau, à l'exception d'une petite longueur de fil aux deux extrémités ; il a réuni ensuite toutes ces bobines bout à bout, de manière à constituer un fil unique de 160 000 mètres de longueur. Il fit communiquer une des extrémités de ce fil, par l'intermédiaire d'un galvanomètre très-sensible, avec un des pôles d'une pile, de 350 éléments de Volta, dont l'autre pôle était réuni à la terre ; l'autre extrémité du fil resta isolée.

L'aiguille fut d'abord fortement déviée et indiqua ainsi le passage de la quantité d'électricité nécessaire pour charger le fil,

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XLI, p. 125.

puis se rapprocha rapidement du zéro. La déviation aurait dû finir par être nulle, si l'isolement par l'enveloppe de gutta-percha eût été parfait; il n'en fut pas ainsi d'une manière absolue, et l'on obtint une déviation fixe inférieure à 5 degrés, ce qui attestait l'existence de fuites extrêmement faibles.

Les choses étant ainsi disposées, on supprima la communication du fil avec la pile et l'on observa les phénomènes suivants : en touchant avec le doigt l'un des bouts du fil, on éprouva une commotion puissante, comme l'eût fait la décharge d'un condensateur; cette commotion avait *une certaine durée*, et, en ne laissant durer qu'un instant le contact du doigt et du fil, on pouvait décomposer la commotion totale en une quarantaine de secousses successives. La commotion était encore sensible lorsqu'il s'écoulait un intervalle de cinq minutes entre le moment où le fil était séparé de la pile et le moment où on le touchait avec le doigt. Si l'on mettait le fil chargé en communication avec le sol par un galvanomètre, l'aiguille était fortement déviée ; et cet effet était encore sensible quand l'intervalle entre l'expérience et la séparation du fil d'avec la pile était d'une demi-heure.

Ces divers phénomènes indiquent évidemment que l'appareil se comporte comme un immense condensateur. En effet, le fil de cuivre avait environ $1^{mm},6$ de diamètre et la couche de gutta-percha $2^{mm},5$ d'épaisseur. Le diamètre de l'armature extérieure formée par le liquide était donc environ 4 fois plus grand que le diamètre du fil, et, si l'on calcule par les formules des condensateurs cylindriques concentriques (175) la capacité d'un pareil fil de 160 000 mètres de longueur, on trouve qu'elle est de près de 60 000 mètres. Comme on doit multiplier encore ce nombre, au moins par 2, pour tenir compte du pouvoir inducteur spécifique de la gutta-percha (381), il en résulte que la capacité électrique du fil employé par Faraday était supérieure à celle d'une sphère conductrice isolée et soustraite à toute influence, de 120 kilomètres de rayon.

443. Des expériences analogues ont été faites par Faraday, à l'aide de 2400 kilomètres de fil enfoui dans le sol, entre Londres et Manchester, et cette ligne lui a servi pour des recherches plus importantes encore sur la transmission des cou-

rants. La ligne est formée par quatre fils parallèles et souterrains, chacun de 600 kilomètres de longueur; ces fils ont été ajoutés bout à bout, de façon à constituer un fil unique dont les deux extrémités et le milieu fussent à la station de Londres. Un galvanomètre fut placé à l'une des extrémités, un second galvanomètre intercalé au milieu du fil, et l'autre extrémité fut réunie avec le sol par un troisième galvanomètre. On a mis le premier galvanomètre en rapport avec l'un des pôles d'une pile dont l'autre pôle communiquait avec le sol. L'aiguille du premier galvanomètre a été immédiatement déviée, mais celle du deuxième ne l'a été qu'au bout d'un intervalle de temps sensible, et celle du troisième un peu plus tard encore. Environ deux secondes se sont écoulées avant que le courant électrique parût être propagé du premier au troisième galvanomètre. On a supprimé la communication du premier galvanomètre avec la pile; l'aiguille de ce galvanomètre s'est immédiatement rapprochée du zéro, celles du second et du troisième se sont ensuite successivement déplacées.

En établissant et supprimant la communication du premier galvanomètre avec la pile, à des intervalles suffisamment rapprochés, on peut, en quelque sorte, lancer dans le fil des ondes électriques successives, de telle façon que les trois galvanomètres soient traversés au même instant par trois ondes différentes. Enfin si, après avoir supprimé la communication de la pile avec le premier galvanomètre, on fait communiquer ce galvanomètre avec le sol, l'électricité dont le fil est chargé se décharge simultanément par ses deux extrémités, de façon que le premier et le troisième galvanomètre sont traversés par des courants électriques de directions opposées (1).

Si l'on essaye de répéter les expériences précédentes avec une ligne télégraphique de même longueur, dont les fils sont librement suspendus dans l'atmosphère, les effets sont très-peu marqués; les trois galvanomètres sont déviés ou reviennent au repos presque exactement au même instant.

Dans les expériences relatives aux fils souterrains, on peut sub-

(1) L'existence de ces courants de charge et de décharge dans les fils souterrains avait été observée déjà par M. W. Siemens. *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXIX, p. 508).

stituer aux trois galvanomètres trois appareils télégraphiques de Bain, dans lesquels le passage du courant se traduit par des traits bleus tracés par un crayon fixe en fer sur une bande de papier mobile, imprégnée de ferrocyanure de potassium. Si l'on interrompt le circuit à des intervalles très-rapprochés, l'appareil le plus voisin de la pile trace une ligne discontinue composée de traits pleins et nettement séparés; le second et le troisième appareil tracent, au contraire, des traits pleins réunis par des traits déliés qui indiquent que l'électricité met un certain temps à sortir du fil. Si même les interruptions du courant sont suffisamment rapprochées, les appareils, sauf le premier, ne tracent plus qu'une ligne continue.

444. **Remarques sur la propagation de l'électricité.** — Le retard qu'éprouve la propagation de l'électricité dans les fils souterrains s'explique aisément par l'énorme accroissement de la capacité électrique de ces fils ; mais les dernières expériences de Faraday mettent en évidence un autre phénomène important, c'est que, si on lance dans un fil le courant d'une pile pendant un intervalle de temps très-court, la durée de ce courant aux différents points par lesquels il passe successivement augmente de plus en plus, en même temps que l'intensité diminue. L'espèce d'onde électrique qui existait dans la première partie du fil s'étale donc de plus en plus, à mesure qu'elle se propage. Ce phénomène, qui avait déjà été signalé par MM. Fizeau et Gounelle (1), a été étudié dans ces dernières années d'une manière particulière par M. Varley (2), à l'aide d'une ligne télégraphique artificielle, présentant à peu près les propriétés électriques d'un câble sous-marin établi entre l'Angleterre et l'Australie.

On conçoit, par cette seule remarque, que la propagation de l'électricité n'est pas un phénomène simple, susceptible d'une définition exacte comme pour le son ou la lumière, mais nous ne pouvons pas discuter ici ce problème complexe, et nous nous bornerons à donner, à titre de renseignement, les vitesses de propagation mesurées par différents physiciens dans des fils métalliques. Tous les observateurs, sauf M. Wheatstone et M. Fe-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXX, p. 139.
(2) *Revue des cours scientifiques*, t. V, p. 89,

lici, ont employé des courants interrompus et des méthodes analogues à celle de Faraday.

NOMS DES OBSERVATEURS	NATURE DU FIL MÉTALLIQUE	VITESSE EN KILOMÈTRES PAR SECONDE	OBSERVATIONS
M. Wheatstone.	Cuivre.	420 000	Décharges d'une bouteille de Leyde.
MM. Fizeau et Gounelle. .	Cuivre.	180 000	Fil télégraphique français entre Paris, Rouen et Amiens.
Id.	Fer.	100 000	
M. Mitchell.	Fer.	45 600	Télégraphe de Cincinnatti à Pittsburgh.
M. Walker.	Fer.	30 000	Télégraphes américains entre Boston et New-York.
Les astronomes des observatoires de Greenwich et d'Edimbourg.	Cuivre.	12 200	Fil aérien.
Les astronomes des observatoires de Greenwich et de Bruxelles.	Cuivre.	4 300	Fil de Londres à Bruxelles en grande partie plongé dans la mer.
Faraday.	Cuivre.	1 200	Fil plongé dans la terre entre Londres et Manchester.
M. Felici.	Cuivre.	260 000	Décharges de la bouteille de Leyde.

Les différences énormes qui se remarquent dans ce tableau sont dues en partie aux procédés d'observation, qui étaient plus ou moins précis, mais surtout à la présence des conducteurs voisins, qui avaient pour effet d'augmenter la capacité électrique des fils, et à la difficulté de préciser exactement ce qu'on doit entendre par vitesse de propagation de l'électricité. Nous citerons particulièrement à ce sujet les recherches remarquables de M. Gaugain[1] sur les lois de la propagation dans les conducteurs médiocres.

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LIX, p. 5; t. LX, p. 326 et t. LXIII, p. 201.

CHAPITRE XI

DÉCHARGES DISRUPTIVES

DURÉE DE LA DÉCHARGE.

445. La décharge disruptive se produit sous différentes formes qui ont reçu les noms de *lueurs*, *d'aigrettes* et *d'étincelles*. Ces différentes formes ne sont bien distinctes les unes des autres que dans les cas extrêmes, et l'on peut réaliser toutes les apparences intermédiaires; mais, avant d'étudier les circonstances qui influent sur la forme même de la décharge, nous pouvons examiner d'abord la durée de l'étincelle ordinaire, les particularités qu'elle présente, et les conditions dans lesquelles elle se produit. Cette question vient d'ailleurs naturellement à la suite des expériences relatives à la durée de la propagation.

446. **Expériences de M. Feddersen.** — La durée de la décharge est très-variable, comme on l'a vu déjà par les expériences de M. Wheatstone et par celles de Weber; en étudiant aussi ce phénomène par la méthode du miroir tournant, M. Feddersen [1] a été conduit à des résultats imprévus. Le miroir tournant recevait d'une machine électro-magnétique un mouvement de rotation sensiblement uniforme (de 10 à 100 tours par seconde); la même machine provoquait la décharge à un instant donné à l'aide d'un arrangement facile à imaginer. En plaçant l'œil dans la direction des rayons réfléchis, on apercevait l'image de l'étincelle allongée et l'on pouvait déterminer sa longueur en la proje-

[1] *Pogg. Ann.* T. CIII, p. 69. — *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LIV, p. 435 et t. LXIX p. 178.

tant sur une échelle située derrière le miroir à une distance convenable. On obtenait encore de meilleurs résultats à l'aide d'un miroir concave en recueillant une image *réelle* de l'étincelle, soit sur une lame de verre dépoli, soit sur une couche de collodion, comme pour les épreuves photographiques. M. Feddersen a obtenu ainsi trois espèces de décharges bien distinctes.

1° Lorsqu'on dispose une colonne d'eau sur le trajet du conducteur que doit parcourir la décharge, de manière à y introduire des résistances considérables, la décharge est *intermittente*, l'électricité s'échappe successivement par étincelles isolées et comme goutte à goutte au point d'interruption de l'arc. L'image de la décharge est formée alors, en supposant l'axe de rotation vertical, d'une série de lignes droites verticales, lumineuses, très-nettement séparées par des intervalles obscurs.

Les premières étincelles sont d'abord équidistantes, puis elles s'écartent de plus en plus les unes des autres à mesure qu'on avance vers la fin de la décharge, sans que leur succession paraisse suivre une loi déterminée. Ce phénomène peut être rapproché des résultats observés par M. Gaugain sur l'état variable des condensateurs (376) déchargés par des conducteurs médiocres; toutefois, dans les expériences de M. Gaugain, les intervalles des étincelles croissaient comme les termes d'une progression géométrique, tandis que les étincelles intermittentes de M. Feddersen ne suivent pas la même loi.

L'intervalle des étincelles augmente avec la résistance, comme on pouvait le prévoir, et diminue quand la distance explosive, c'est-à-dire le chemin traversé par l'étincelle dans l'air, va en augmentant. Aucune relation simple ne paraît exister entre ces différents éléments des expériences.

2° Quand on diminue la résistance de plus en plus, en substituant à l'eau, par exemple, des colonnes d'acide sulfurique, la durée totale du phénomène diminue, les étincelles se rapprochent et la décharge devient *continue;* l'électricité s'écoule alors dans le circuit conducteur en formant un courant non interrompu jusqu'à son complet épuisement. L'image de la décharge se compose d'une ligne verticale nettement terminée et de deux bandes parallèles horizontales faiblement lumineuses, s'éloignant des extrémités de cette ligne et séparées par un intervalle

plus ou moins obscur. A mesure que la résistance diminue encore, l'intervalle obscur qui sépare les deux traînées lumineuses se remplit peu à peu de lumière; en même temps la durée totale diminue, mais non pas sans limite. Pour une certaine résistance, la durée est *minimum* et, à partir de ce moment, les traînées lumineuses s'allongent en changeant de caractère.

3° La décharge devient *oscillante*, lorsqu'elle s'effectue dans des conditions où la durée augmente, quand la résistance diminue; les étincelles oscillent alors d'une armature à l'autre avec une intensité graduellement décroissante.

La décharge débute habituellement par un trait lumineux et l'oscillation se manifeste ensuite par des caractères différents. Si l'arc est très-conducteur, l'image a la forme d'une bande lumi-

Fig. 172.

neuse sur laquelle se dessinent deux lignes de taches brillantes produites alternativement aux deux pôles et à des distances sensiblement égales (fig. 172). Si la résistance est plus grande, ces taches se transforment en des espèces de flammes qui s'inclinent de plus en plus, indiquant ainsi que la matière lumineuse s'échappe d'un pôle à l'autre avec une vitesse décroissante. Ces flammes présentent une alternance plus ou moins régulière, des teintes et des formes très-variées, suivant la résistance du circuit et la nature des métaux entre lesquels a lieu la décharge (fig. 173).

Tous les détails des images ne peuvent être observés que par l'emploi de la photographie; seulement il est nécessaire alors de bien fixer la position de l'étincelle. Pour cela, on couvre complétement les deux pôles d'une couche de gomme laque dans laquelle on pratique deux ouvertures de grandeur convenable, aux points les plus rapprochés.

447. Comme exemple de ces transformations de la décharge, nous citerons les résultats d'expériences faites avec des fils métalliques de différentes longueurs allant jusqu'à 1400 mètres. Les résistances ont été évaluées en colonnes d'acide sulfurique

d'un millimètre de diamètre et de densité égale à 1,25. La décharge était celle d'une seule bouteille de Leyde de 2 décimètres carrés de surface, dont la paroi avait 4 à 5 millimètres d'épaisseur; la capacité de cette bouteille, en prenant 2 comme pouvoir

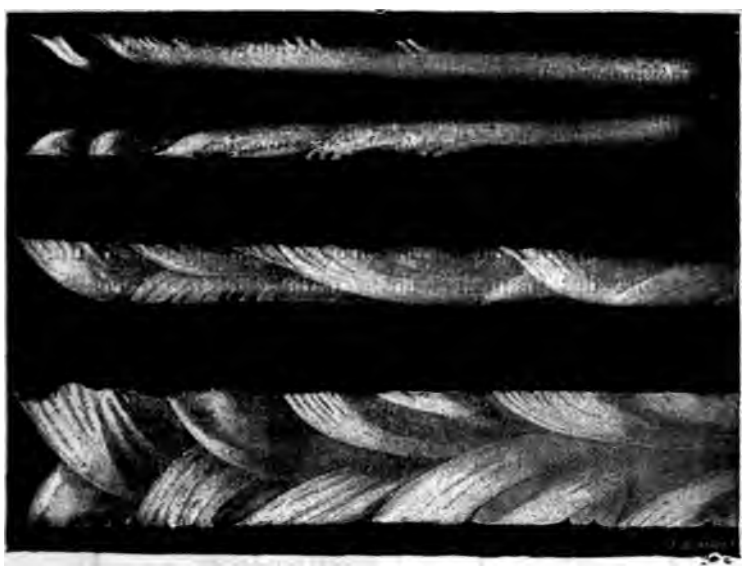


Fig. 173.

inducteur spécifique du verre, était donc d'environ $0^{m},7$. La distance explosive est restée la même dans toutes les expériences.

NATURE DE LA DÉCHARGE	RÉSISTANCE	OBSERVATIONS
Continue	1 mètre.	Image de 30 à 50^{mm} sur le verre.
	0,105	— 10 à 6
	0,072	Un trait de 4 à 5^{mm} de largeur.
	0,058	Un trait de 3 à 4^{mm} —
Oscillante. . . .	0,049	Un trait de 4^{mm}; le plus souvent on en aperçoit un deuxième.
	0,045	Deux traits.
	0,019	Trois traits.
	0,009	Cinq traits.
	0,007	Six traits environ, de 3 à 4^{mm} de largeur.

D'après ce tableau, la résistance limite qui sépare les deux espèces de décharges est d'environ $0^m,058$.

448. Une question se présente alors, c'est de déterminer quelle doit être la résistance du circuit pour que la durée de la décharge soit minimum, et que l'image n'ait pas encore de divisions transversales indiquant le début des décharges oscillantes.

L'expérience indique que cette résistance limite est indépendante de la distance explosive et qu'elle est sensiblement en raison inverse de la racine carrée du nombre des bouteilles de la batterie, en supposant qu'on opère avec des bouteilles identiques, c'est-à-dire en raison inverse de la racine carrée de la *capacité électrique* du corps électrisé. En appelant λ cette résistance limite, n le nombre des bouteilles de la batterie et a un coefficient constant, on a donc

$$\lambda = \frac{a}{\sqrt{n}}.$$

Le tableau suivant est le résumé d'une série d'expériences :

SURFACE DE LA BATTERIE	RÉSISTANCE LIMITE	
	OBSERVÉE	CALCULÉE
1 bouteille.	0,058	0,056
2 »	0,041	0,040
4 »	0,025	0,028
8 »	0,018	0,020
16 »	0,014	0,014

On a vu précédemment que la résistance limite ne peut pas être déterminée avec une grande exactitude ; l'accord des expériences avec la formule est donc entièrement satisfaisant.

Pour obtenir de belles décharges oscillantes, il faut donc opérer avec de faibles résistances, des batteries de grande surface, et produire l'étincelle entre des fils métalliques ou mieux encore entre des boules ; l'expérience indique aussi que les boules de fer sont celles qui donnent les meilleurs effets.

449. Toutes ces oscillations successives sont équidistantes; il suffit, pour s'en assurer, de mesurer sur une épreuve la distance de deux décharges éloignées et de la diviser par le nombre des décharges intermédiaires; la distance moyenne ainsi obtenue est parfaitement constante.

On détermine la durée d'oscillation t, ou la période, par la vitesse de rotation du miroir et la distance moyenne des décharges successives sur l'épreuve photographique; cette période est indépendante de la distance explosive, c'est-à-dire de la charge ou du potentiel, et elle paraît proportionnelle à la racine carrée du nombre des bouteilles. On peut donc écrire

$$t = b\sqrt{n};$$

la constante b dépend de l'arc conducteur et de la nature de chaque bouteille. Voici la comparaison de cette formule avec l'expérience; l'unité de temps est le millionième de seconde.

SURFACE DE LA BATTERIE	PÉRIODE D'OSCILLATION	
	OBSERVÉE	CALCULÉE
16 bouteilles.	44,6	»
8 »	31,4	31,5
4 »	22,4	22,3
2 »	15,6	15,8

La loi peut être énoncée d'une manière plus générale en disant que la période est proportionnelle à la racine carrée de la capacité électrique des corps électrisés. On élimine ainsi la forme des condensateurs, et cette manière de traduire la loi se vérifie d'ailleurs par la décharge des cascades.

450. La durée des oscillations augmente en même temps que la résistance de l'arc intermédiaire, mais d'une manière moins rapide que la simple puissance et plus vite que la racine carrée, comme on le voit dans le tableau suivant où la décharge provenait de 10 bouteilles, et où l'arc conducteur était formé par un fil métallique de $1^{mm},35$ de diamètre :

LONGUEUR DE L'ARC CONDUCTEUR l	PÉRIODE t	$\frac{t}{l}$	$\frac{t^2}{l}$
mètres.			
5,26	1,32	0,251	0,33
25,26	4,1	0,162	0,66
115,26	9,35	0,081	0,77
1343	39,8	0,030	1,18

L'accroissement de résistance diminue aussi le nombre des oscillations en même temps qu'il en augmente la durée. Enfin la durée totale de la décharge et le nombre des oscillations augmentent avec la distance explosive.

451. M. Feddersen a constaté aussi l'influence de quelques circonstances accessoires. Ainsi, la présence d'un condensateur sur une dérivation de l'arc conducteur augmente la durée des oscillations. Cela peut se concevoir aisément : quand on provoque la décharge, une partie de l'électricité sert d'abord à charger le condensateur interposé et l'effet doit être le même que si, sans modifier la charge totale, on augmentait la surface de la batterie principale.

Si l'on fait passer la décharge dans deux fils voisins, de façon que l'électricité les parcoure dans le même sens, la durée d'oscillation est plus grande que si les fils étaient éloignés les uns des autres. La durée des oscillations est diminuée, au contraire, lorsque deux fils voisins sont parcourus par la décharge en sens contraires. On voit donc qu'un fil traversé par une décharge agit sur un fil voisin, parcouru dans le même sens, comme le ferait un accroissement de résistance, c'est-à-dire qu'une décharge passant dans un fil nuit à une décharge parallèle passant dans un fil voisin; une pareille décharge favorise, au contraire, le passage d'une décharge voisine, parallèle et dirigée en sens contraire.

On peut rapprocher ces résultats des expériences par lesquelles M. Riess a étudié l'influence réciproque des décharges qui parcourent des fils voisins; cette question sera examinée avec plus de développements à propos des phénomènes *d'induction* produits par les décharges électriques.

452. Expériences de M. Felici. — M. Felici (1) a repris les expériences de M. Feddersen par une méthode analogue à celle qui a été imaginée par Arago pour évaluer la durée des éclairs, plus commode à employer que celle du miroir tournant et, à certains points de vue, plus avantageuse. Sur un disque opaque il a ménagé un certain nombre de traits transparents; ce disque, qui tourne avec une grande vitesse, est placé entre l'observateur et l'appareil producteur des étincelles. En examinant les traits transparents avec une lunette, on les verra comme immobiles au moment de la décharge. Si la lumière est de très courte durée, les traits paraîtront avec leurs dimensions véritables; mais si la lumière dure un temps appréciable, les traits transparents sembleront élargis. C'est ce que M. Felici a toujours observé pour de grandes vitesses de rotation, et l'on conçoit que l'élargissement des traits permette de déterminer la durée de visibilité du phénomène. M. Felici dit même avoir aperçu une multiplication des traits indiquant l'existence de décharges oscillantes, mais il n'a pas rapporté de mesures.

En réalité, l'appareil ne paraissait pas comporter une grande précision dans les conditions où l'a employé M. Felici ; mais, en y apportant quelques modifications, MM. Cazin et Lucas en ont depuis tiré un excellent parti.

453. Expériences de MM. Cazin et Lucas. — L'appareil de MM. Cazin et Lucas (2) se compose d'un disque en mica sur lequel on a ménagé 180 traits transparents. Ce disque tourne dans un plan vertical en face d'un autre disque opaque fixe sur lequel on a tracé seulement 6 traits transparents formant vernier avec les premiers, de façon que, pour une rotation du disque mobile égale à $\frac{1}{180}$ de circonférence, les différents traits du vernier fixe se trouvent successivement en regard d'une division du disque, ce qui produit 6 coïncidences pendant chacune desquelles un des traits est visible. Pour un tour entier, le nombre des coïncidences sera donc 180×6 ou 1080; si le disque fait seulement 100 tours par seconde, le nombre des coïncidences par seconde sera supérieur à 100 000. Afin que les traits ne soient visibles qu'au moment même des coïncidences, on place

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LXIX, p. 248.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XXVI, p. 477.

la source de lumière, une étincelle par exemple, au foyer d'un collimateur qui envoie sur les disques des rayons normaux, et l'on observe de l'autre côté avec une lunette qui vise sur les traits eux-mêmes.

On conçoit aisément la marche des expériences. Si l'étincelle a une durée inappréciable, l'appareil ne sera éclairé que pendant un temps infiniment court, et, à ce moment, en vertu de la rotation du disque, il se produira ou non une coïncidence; suivant les chances, on pourra donc apercevoir dans la lunette un trait transparent ou n'en voir aucun.

Si l'étincelle a une durée sensible, on verra successivement plusieurs coïncidences qui paraîtront simultanées à cause de la persistance des impressions sur la rétine. Soit θ l'intervalle de deux coïncidences, t la durée de l'étincelle, et posons $t = K\theta$. On apercevra K traits brillants, si l'étincelle débute immédiatement après une coïncidence, et $(K + 1)$ traits si elle se produit un peu avant le moment d'une coïncidence; la probabilité de voir $(K + 1)$ traits est évidemment la même que celle de voir un seul trait par suite d'une illumination instantanée. Cette probabilité dépend des dimensions relatives des traits transparents et des intervalles opaques; c'est une constante pour chaque appareil, désignons-la par μ. Pour un nombre N d'étincelles, on verra donc μN fois $(K + 1)$ traits et $(1 - \mu)$ N fois K traits seulement. Si T est le nombre total de traits qui ont été aperçus pendant toute la série des étincelles, on aura donc

$$T = N[\mu(K + 1) + (1 - \mu)K] = (\mu + K)N,$$

ou bien

$$\frac{T}{N} - \mu = K = \frac{t}{\theta},$$

équation qui donne la durée t de chaque étincelle.

Pour déterminer la probabilité μ, on pourrait faire tourner le disque très-lentement, de façon que la durée d'une étincelle fût insensible par rapport à l'intervalle de deux coïncidences, et noter combien de fois, sur un nombre déterminé d'étincelles, on aperçoit un trait brillant. Il est plus simple encore de remplacer l'appareil à étincelles par une lumière fixe et de donner au

disque un certain nombre de positions distribuées au hasard. On a constaté ainsi, avec l'appareil qui a servi aux expériences, qu'on apercevait 70 fois un trait pour 100 positions du disque mobile. Le coefficient de probabilité μ était donc 0,70.

454. MM. Cazin et Lucas ont étudié l'influence des diverses circonstances qui peuvent modifier la durée de la décharge d'une batterie. Ils se servaient pour cela d'une machine de Holtz marchant d'une manière continue à l'aide d'un petit moteur à gaz. Les deux pôles de la machine communiquaient séparément avec les deux armatures d'une batterie et avec les deux boules de l'appareil à étincelles placées au foyer du collimateur. Un observateur visant à la lunette notait à chaque étincelle le nombre des traits brillants visibles, et un mouvement d'horlogerie donnait la vitesse de rotation du disque. Dans chaque série d'expériences on faisait varier seulement l'une des circonstances, on traçait la courbe qui représentait la marche du phénomène et, d'après l'allure de la courbe, on essayait de la remplacer par une formule mathématique. Les formules relatives à chacun des éléments du problème étant ainsi déterminées, on les multipliait les unes par les autres pour obtenir la loi générale. Cette manière de traduire les expériences exige quelques précautions : il faut s'assurer que les différentes variables dont dépend le phénomène sont ainsi isolées dans des facteurs différents, sans quoi l'hypothèse implicite de la séparation des variables pourrait conduire à des formules inexactes.

Quoi qu'il en soit, les résultats des expériences ont été résumés par l'expression suivante

$$t = \Pi \frac{(1 - a^n)(1 - b^d)}{1 + cr^{\frac{1}{3}}}, \qquad (1)$$

dans laquelle t représente la durée de l'étincelle, n le nombre des bouteilles de la batterie, d la distance explosive, et r la résistance du circuit conducteur. Les quantités a et b sont des constantes qui ne dépendent pas de la nature des boules de l'excitateur, ni de la nature de milieu; la constante Π dépend au contraire de la nature des boules, de l'état de leurs surfaces et de plusieurs causes mal définies.

Ces différentes constantes sont d'ailleurs assez mobiles : ainsi, suivant les circonstances extérieures, a a varié de 0,68 à 0,89, b de 0,83 à 0,94. La constante H était égale à 52 pour le platine neuf, à 157 pour le cuivre et à 248 pour le zinc; avec les mêmes boules de platine mouillées on trouva 94, et, quand ces boules eurent servi longtemps aux expériences et reçu un grand nombre de décharges, la valeur de H s'éleva jusqu'à 149. De tels changements dans la valeur des constantes ne permettent pas d'attribuer à la formule une grande autorité.

Quant à la forme donnée à l'influence de la résistance, elle ne peut pas être rigoureuse, parce qu'elle conduirait à une valeur nulle pour la durée de la décharge dans un circuit à très-grande résistance, ce qui est contraire aux observations de M. Feddersen et évidemment inexact.

En disposant en cascade deux batteries formées, l'une de n bouteilles et l'autre de n' bouteilles, désignant par t' la durée de la décharge d'une pareille cascade et par t la durée de la décharge d'une batterie unique formée de l'ensemble $n+n'$ des bouteilles dans les mêmes conditions, on a trouvé que les expériences peuvent être représentées par la formule

$$t'=4t\left(\frac{nn'}{(n+n')^2}\right)^{\frac{4}{3}}. \qquad (2)$$

Si l'on fait $n=n'$, il vient

$$t'=\frac{4t}{4^{\frac{4}{3}}}=\frac{t}{\sqrt[3]{4}}.$$

La durée de la décharge d'une cascade est donc plus grande que celle de la décharge d'une batterie unique composée de toutes les bouteilles qui forment la cascade.

Comme la constante a est plus petite que l'unité, on voit que la durée de la décharge augmente avec la surface de la batterie, c'est-à-dire avec la capacité électrique. La disposition des bouteilles en cascade a pour effet de diminuer la capacité électrique de la batterie, et l'on pouvait prévoir que ce mode de groupement diminuerait aussi la durée de la décharge.

455. D'ailleurs, toutes les méthodes dans lesquelles on se pro-

pose de juger de la durée de l'étincelle par un phénomène de visibilité ne comportent pas une grande précision. Le résultat peut dépendre en grande partie de la vue de chaque observateur, et l'on conçoit même que, de deux étincelles de durées inégales, la plus courte puisse être visible pendant plus longtemps si la lumière est plus intense : les limites du phénomène sont donc moins bien définies que ne l'était la durée des oscillations dans les expériences de M. Feddersen. D'autre part, les matières portées à l'incandescence par la décharge peuvent rester encore lumineuses après que la décharge a cessé, et il n'existe aucun rapport déterminé entre ces deux effets. Malgré ces observations sur la portée théorique des deux formules données par MM. Cazin et Lucas, on peut les considérer comme représentant d'une manière empirique la marche générale du phénomène et, à ce titre, elles sont très-utiles pour servir de guide dans des recherches ultérieures.

456. **Décharges des appareils d'induction.** — La décharge des bobines d'induction présente des analogies avec celle des batteries, et nous dirons ici quelques mots des phénomènes que l'on observe alors, bien que cette question sorte un peu des limites de notre cadre. Quand le courant inducteur est interrompu et que le circuit du fil induit reste fermé d'une manière permanente, il se produit dans ce fil un courant dont l'intensité croît d'abord, puis décroît jusqu'à zéro, et dont la direction est de même sens que celle de l'inducteur, c'est-à-dire direct.

Si le circuit induit est fermé seulement pendant un instant très-court et au bout d'un temps variable après que le courant inducteur a été interrompu, on constate par un galvanomètre que le courant induit est alternativement direct ou inverse ; les extrémités d'un fil induit ouvert sont donc, à l'ouverture du courant inducteur, alternativement positives et négatives. M. Berstein (1) a constaté ainsi que l'impulsion maximum imprimée à l'aiguille du galvanomètre par ces courants alternatifs diminue à peu près proportionnellement au temps, et que la durée des oscillations est constante, sauf pour le premier courant direct qui dure un peu plus longtemps. Ainsi, dans une des

(1) *Pogg. Ann.*, t. CXLII, p. 54. — *Journal de Physique*, t. I, p. 77.

expériences, la durée d'une oscillation a été, en prenant toujours pour unité de temps le millionième de seconde, égale à 50 unités. Quant à la durée totale de la décharge, elle a été de 1 400 avec deux éléments de Grove pour courant inducteur, et de 700 seulement avec un élément Daniell. La période d'oscillation augmente d'ailleurs avec l'intensité du courant inducteur et la capacité du circuit induit (1).

457. **Étincelles composées.** — Si le circuit induit reste ouvert et si la distance qui sépare les extrémités du fil est assez faible pour être franchie par le courant, on obtient plusieurs étincelles successives à chacune des interruptions du courant inducteur; la succession régulière de ces étincelles démontre qu'elles sont dues aux oscillations du courant induit, et qu'elles ne correspondent pas aux décharges intermittentes des batteries. La décharge totale forme alors ce qu'on appelle une *étincelle composée*. M. Nyland (2) a étudié ce phénomène par une méthode ingénieuse : une des extrémités du fil induit est mise en communication avec un diapason muni d'une pointe d'acier qui touche un cylindre de métal enfumé, l'autre extrémité du fil communique avec le cylindre. Quand le diapason vibre et que le cylindre est en mouvement, la pointe trace une ligne sinueuse, et, chaque fois que le fil induit est parcouru par une décharge, cette ligne est marquée d'un grand nombre de points qui correspondent aux différentes étincelles. M. Nyland a constaté ainsi que chacune des décharges renferme parfois des centaines d'oscillations, et que la période des oscillations successives diminue de plus en plus.

458. M. Ogden Rood et M. Cazin (3) ont chacun de leur côté observé ces étincelles composées par des méthodes analogues. Un disque mobile opaque, sur lequel on a ménagé une fente radiale ou une série de fentes, est éclairé par la décharge ; chacun des traits donne plusieurs images qui paraissent simultanées en vertu de la persistance des impressions sur la rétine, et qui sont dues aux différentes étincelles élémentaires

(1) Schiller, *Pogg. Ann.*, t. CLII, p. 535. — *Journal de Physique*, t. IV, p. 88.
(2) *Archives Néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, t. V, p. 292. — *Journal de Physique*, t. I, p. 130.
(3) *Journal de Physique*, t. II, p. 252 et 267.

contenues dans la décharge. Le nombre des traits augmente à mesure que la distance explosive diminue, et M. Cazin a pu en évaluer plus de 500 avec une bobine d'induction de grandeur moyenne, dont les extrémités du fil induit communiquaient avec les armatures extrêmes d'une cascade de trois bouteilles de Leyde. La durée totale de la décharge augmente aussi dans le même sens et peut atteindre $\frac{1}{10}$ de seconde.

459. D'ailleurs, les étincelles élémentaires ne se succèdent pas très-régulièrement, elles se forment par séries de groupes très-serrés, dont il est difficile de démêler tous les détails. M. Alf. Mayer (1) les a observées de la manière suivante. Il fait tourner rapidement autour d'un axe vertical une mince feuille de papier d'imprimerie, recouverte de noir de fumée, formant un disque de 15 centimètres de diamètre. Le simple mouvement de rotation suffit pour rendre cette feuille parfaitement plane, et on peut l'insérer entre deux boules ou deux pointes, dans l'intervalle que traversent les décharges, même quand la distance ne dépasse pas $\frac{1}{4}$ de millimètre. Chacune des étincelles perce le papier en y laissant une trace permanente, et on y inscrit en même temps les vibrations d'un diapason ; il suffit alors, en examinant le papier par transparence à l'aide d'un microscope, de compter les trous et de mesurer leurs distances pour connaître tous les éléments dont se compose la décharge.

Ainsi, la décharge d'une grande bobine de Ruhmkorff, entre deux pointes de platine distantes d'un millimètre, donne d'abord une première décharge partielle, durant environ $\frac{1}{33}$ de seconde, et représentée par 33 petits trous ronds dont l'intervalle décroît progressivement de manière à se réduire à la moitié de sa valeur primitive. Vient ensuite une seconde décharge ne durant que $\frac{1}{350}$ de seconde, et comprenant au moins 30 trous, plus rapprochés au milieu qu'aux extrémités.

En intercalant une bouteille de Leyde entre les deux électrodes du fil induit, la décharge totale dure, par exemple, $\frac{1}{24}$ de seconde, et se compose de 91 décharges partielles dont chacune comprend de 1 à 4 petits trous, etc.

Ce phénomène est, comme on le voit, très-complexe ; il paraît

(1) *Journal de Physique*, t. IV, p. 153.

d'ailleurs essentiellement lié aux effets d'induction, car on n'observe rien de pareil avec les décharges de batteries.

Distance explosive de l'étincelle.

460. **Description d'un excitateur universel.** — La distance à caquelle peut se produire une décharge électrique entre deux londucteurs au travers du milieu qui les sépare, dépend d'un

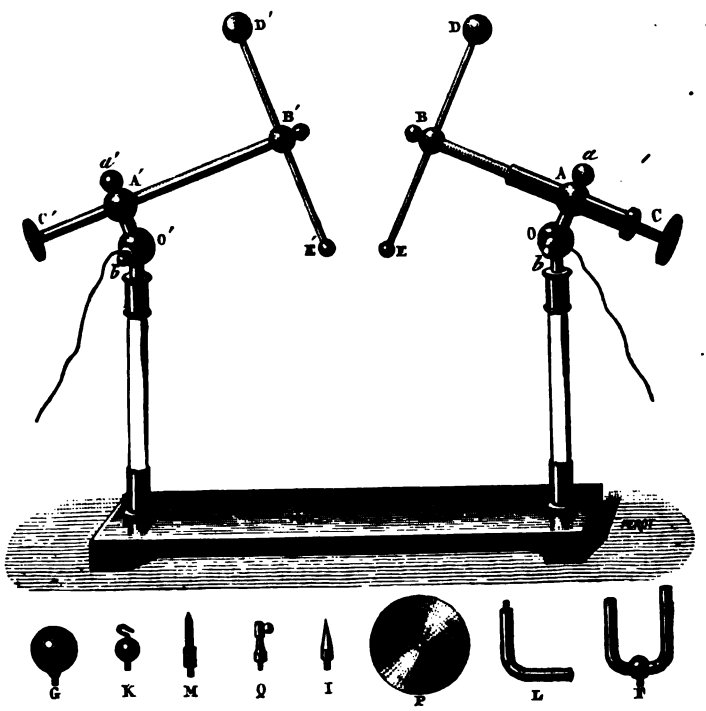


Fig. 174.

grand nombre de circonstances. Comme nous aurons l'occasion d'étudier à ce propos la formation des étincelles dans des conditions très-variées, nous indiquerons ici un excitateur universel complet, muni de pièces accessoires qui permettent de répéter la plupart des expériences.

Cet excitateur est représenté par la fig. 174, qui nous dispen-

sera d'une longue description. Les deux boules A et A′ tournent à frottement dur autour de deux charnières O et O′, montées sur des pieds en verre. Ces boules sont traversées par deux branches BC, B′C′, qu'on peut fixer par des boutons de pression *a* et *a′*. L'une des branches est formée d'un manchon renfermant une tige divisée en millimètres et mobile à l'aide d'une vis, de façon qu'on puisse l'allonger par un mouvement lent d'une quantité connue. Les boules B et B′ sont elles-mêmes creuses et traversées par des tiges secondaires DE, D′E′, terminées par des boules. Tous les pas de vis qui terminent les branches principales en B et B′, ainsi que les branches secondaires, sont identiques, de sorte que l'on peut adapter en ces différents points des pièces accessoires de formes très-variées, réunies sur une même planchette : des boules G plus ou moins grosses ; des plateaux P ; des pointes I ; des pinces Q pour tenir des fils métalliques ; des charbons M taillés en cônes pour la lumière électrique ; des crochets K pour soutenir les tubes à gaz raréfiés ; des fourches F que l'on terminera elles-mêmes d'une manière quelconque pour les décharges dérivées ; des branches courbes L pour la production des étincelles dans les liquides, etc.

Les branches de l'excitateur sont réunies aux appareils électrisés par des tringles métalliques ou par des fils que l'on attache à des bornes *b* et *b′* ; ce dernier mode de communication doit être évité le plus possible quand on se sert des machines électriques ordinaires, parce qu'il donne lieu à des pertes d'électricité considérables.

461. Influence de la charge. — Expériences de M. Harris. — M. Harris [1] a trouvé qu'entre deux boules reliées aux deux armatures d'un condensateur, la distance explosive est proportionnelle à la charge électrique. La disposition de son appareil était la suivante : une petite bouteille de Lane d'une forme particulière, comme celle qui est représentée en L (fig. 125), était placée sur le trajet d'une machine électrique à l'armature intérieure d'une bouteille de grandes dimensions, dont l'armature extérieure communiquait avec le sol ; ces deux armatures communiquaient séparément avec les deux boules d'un excitateur. Le nombre des

[1] *Phil. Trans.* (1834), p. 225.

étincelles de la petite bouteille de Lane était proportionnel à la charge de la grande, et l'on constatait que le nombre d'étincelles nécessaire pour provoquer la décharge entre les branches de l'excitateur était proportionnel à la distance explosive. En toute rigueur, il faudrait tenir compte du résidu sur la grande bouteille et de la déperdition. Cette dernière cause est, en général, négligeable, mais le résidu ne l'est pas; pour éviter l'erreur qui en résulte, nous avons déjà dit qu'il faut continuer les expériences, et compter le nombre des étincelles comprises entre deux décharges successives : c'est ce nombre qui est proportionnel à la distance explosive.

Comme le déplacement des boules ne change pas sensiblement la forme du condensateur, on peut dire que la distance explosive entre deux conducteurs donnés, dont l'un communique avec le sol, est proportionnelle au potentiel du conducteur isolé. Toutefois, M. Harris n'indique pas entre quelles limites cette proportionnalité a été vérifiée.

462. **Expériences de M. Riess.** — Les expériences de M. Riess [1] conduisent au même résultat. En opérant avec une batterie constituée par un nombre variable de bouteilles et chargée par l'intermédiaire d'une bouteille de Lane, M. Riess a constaté que la distance explosive, entre deux branches d'un micromètre à étincelles (314) mises en communication séparément avec les deux armatures, est proportionnelle à la densité électrique de la batterie, ou au quotient $\frac{M}{n}$ de la charge M par le nombre n des bouteilles.

Voici, par exemple, quelques-unes des expériences : l'une des boules du micromètre avait $5^l,7$ ($12^{mm},76$) de diamètre, et communiquait avec l'armature intérieure de la batterie; l'autre boule, de $4^l,4$ (9 millimètres) de diamètre, communiquait avec l'armature extérieure et avec le sol; la distance des boules a varié depuis $\frac{1}{2}$ ligne ($1^{mm},12$) jusqu'à une valeur cinq fois plus grande ou $5^{mm},60$. Le tableau suivant donne les valeurs de la charge M observées et calculées dans les différents cas.

[1] *Reibungselektricität*, Bd. I, p. 377.

DISTANCE EXPLOSIVE	2 BOUTEILLES		3 BOUTEILLES		4 BOUTEILLES		5 BOUTEILLES	
	OBS.	CALC.	OBS.	CAL.	OBS.	CALC.	OBS.	CALC.
1	»	»	3	2,5	3,5	3,3	4,3	4,2
2	3	3,3	5,5	5	7	6,7	8,5	8,3
3	4,6	5,0	8	7,5	10,1	10	12,5	12,5
4	6,4	6,7	10,5	10	13,5	13,3	16	16,7
5	7,5	8,3	»	»	16	16,7	»	»

Lorsque la charge observée n'est pas exprimée par un nombre entier, cela indique que le nombre des étincelles de la bouteille de Lane comprises entre les décharges successives n'était pas constant, et qu'on en prenait la moyenne.

Le calcul et l'observation sont en général assez concordants; néanmoins, on peut remarquer que, dans chaque série, la charge calculée pour le plus grand écart des boules est le plus souvent supérieure à la charge observée; si l'on admet ce résultat comme général, on en conclura que la distance explosive augmente plus rapidement que la densité électrique, c'est-à-dire que la différence des potentiels des deux armatures.

463. **Expériences de M. Knochenhauer.** — Des expériences de M. Knochenhauer [1], quoique les distances soient restées aussi comprises entre des limites trop restreintes, conduisent à la même conclusion. Voici en effet quelques résultats :

DISTANCE EXPLOSIVE	DENSITÉ ÉLECTRIQUE	DIFFÉRENCE
0,2	4,25	
		2,77
0,4	7,02	
		5,02
0,8	12,04	
		4,91
1,2	16,95	
		4,71
1,6	21,66	
		4,80
2	24,46	

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XVII, p. 78.

La distance est ici évaluée en lignes, et la plus grande qui ait été atteinte est d'environ $4^{mm},5$. On voit que, pour un même accroissement $0^l,4$ de la distance explosive, la densité électrique varie de moins en moins, à mesure que cette distance devient plus grande.

464. M. Riess a constaté aussi que, pour une même charge, la distance explosive augmente quand on remplace une des boules par un disque, et qu'elle est plus grande encore entre deux disques; mais, dans chaque cas particulier, la proportionnalité de la charge à la distance explosive se vérifie. La différence de potentiel que l'on peut atteindre avec les batteries ordinaires, dans les conditions où M. Riess s'est placé, est trop faible pour que l'on puisse considérer la loi des distances comme suffisamment établie par expérience. Toutefois, si l'on a soin de se maintenir dans les mêmes limites, on peut, comme l'indique M. Riess, se servir de la distance explosive pour évaluer la quantité de chaleur qui correspond à une décharge de batterie. En effet, la quantité de chaleur Q dégagée a pour expression :

$$Q = A\frac{M^2}{n}.$$

Si, d'autre part, la distance explosive d peut être exprimée par la formule

$$d = a\frac{M}{n},$$

on en déduit

$$Q = A\frac{d^2n^2}{a^2n} = \left(\frac{A}{a^2}\right)nd^2.$$

Cette quantité de chaleur est donc proportionnelle au nombre des bouteilles de la batterie et au carré de la distance explosible.

465. **Expériences de M. Thomson.** — M. Thomson [1] a essayé de mesurer la différence de potentiel nécessaire pour produire une étincelle dans l'air entre deux plateaux parallèles, à des distances différentes. Lorsque les plateaux entre lesquels on provoque ainsi des décharges sont bien plans et parallèles, les étincelles

[1] *Reprint of papers*, p. 247.

partent le plus souvent du pourtour et se déplacent constamment. Pour rendre le phénomène plus régulier, l'un des plateaux (1), l'inférieur, qui restait fixe et en communication avec le sol, était légèrement bombé en calotte sphérique ; de cette façon, les étincelles se produisaient toujours au milieu des plateaux en regard, et la convexité de la calotte était assez faible pour que la distribution des surfaces de niveau et la pression électrique fussent sensiblement les mêmes qu'entre deux plans conducteurs parallèles situés à la même distance, et maintenus à la même différence de potentiels.

Le plateau supérieur pouvait s'élever ou s'abaisser à l'aide d'une vis micrométrique dont le pas était de $\frac{1}{25}$ de pouce (environ 1 millimètre) et dont la tête était divisée en 40 parties, de sorte que l'on pouvait évaluer la distance explosive à $\frac{1}{400}$ de millimètre environ. Pour fixer exactement le moment où les deux plateaux étaient en contact sans pression, on avait recours au phénomène électrique lui-même : il suffisait de faire passer entre les deux plateaux une série continue d'étincelles et de rapprocher peu à peu le plateau supérieur jusqu'à ce que les étincelles fussent invisibles ; la position de la vis micrométrique indiquait alors le contact électrique.

La différence des potentiels était évaluée par un électromètre absolu (278), formé de deux plateaux dont l'un communiquait avec le sol, et dont l'autre, relié au plateau supérieur de l'appareil à décharges, était porté par un fléau de balance. Le poids nécessaire pour maintenir, dans chaque expérience, les deux plateaux à la même distance, malgré l'attraction électrique qui s'exerçait entre eux, était proportionnel au carré de la différence des potentiels. Dans d'autres expériences, on se servait d'un électromètre de torsion, en déterminant la torsion totale nécessaire pour maintenir à la même distance deux conducteurs dont l'un communiquait avec le sol, et l'autre avec le plateau supérieur de l'appareil à décharges ; la torsion était encore proportionnelle au carré de la différence des potentiels. Les deux méthodes ont donné des résultats parfaitement concordants, et on en a déduit le tableau suivant :

(1) Ces plateaux n'étaient pas vernis.

DISTANCE EXPLOSIVE d	DIFFÉRENCE DE POTENTIEL V	$\frac{V}{d}$	PRESSION $p=\frac{1}{8\pi}\left(\frac{V}{d}\right)^2$
mm.			
0,0254	1,353	53,27	112,90
0,0508	1,886	37,13	54,84
0,0762	2,419	31,74	40,07
0,1016	2,744	27,01	29,03
0,1270	2,999	23,62	22,20
0,1524	3,323	21,81	18,93
0,2032	3,960	19,49	15,12
0,2540	4,552	17,92	12,77
0,3048	5,020	16,47	10,80
0,3556	5,592	15,73	9,84
0,4064	6,149	15,13	9,11
0,4572	6,748	14,76	8,60
0,6096	8,771	14,39	8,23
0,7493	9,80	13,08	6,81
0,8636	10,98	12,72	6,44
0,9779	12,02	12,29	6,01
1,0414	13,01	12,49	6,20
1,1303	13,89	12,29	6,01
1,2192	14,70	12,06	5,79
1,3208	15,50	11,74	5,48
1,3970	16,27	11,65	5,40
1,4732	17,02	11,56	5,31
1,5240	17,68	11,60	5,35

La troisième colonne de ce tableau montre que la différence des potentiels augmente beaucoup moins rapidement que la distance explosive, quand les plateaux sont très-rapprochés, et que le rapport de ces deux quantités n'est sensiblement constant qu'à partir de distances supérieures à 1 millimètre. Les nombres renfermés dans la dernière colonne expriment la pression électrostatique que l'électricité exerce sur l'air entre les deux plateaux, en admettant, avec M. Thomson, que cette pression a pour valeur $2\pi\mu^2$, et que la densité électrique μ sur l'un des plateaux a pour expression $\mu=\frac{1}{4\pi}\cdot\frac{V}{d}$, laquelle n'est exacte en toute rigueur que si les plateaux ont des dimensions très-grandes par rapport à la distance qui les sépare. La pression est évaluée en milligrammes par millimètre carré; les potentiels ont été calculés d'après les tables de M. Thomson et sont expri-

més ici à l'aide d'une unité sur laquelle nous reviendrons plus loin (480).

466. **Expériences de M. Gaugain.** — Dans ces expériences de M. Thomson, la distance explosive était plus faible encore que dans les précédentes. M. Gaugain(1) a cherché, au contraire, à se placer dans des conditions où cette distance explosive pouvait être notablement augmentée. La décharge avait lieu entre deux boules, dont l'une était en communication avec le sol et l'autre avec un conducteur électrisé. Ce conducteur était formé par un plateau isolé P, relié avec une machine électrique et réuni dans certains cas à l'armature intérieure d'une bouteille de Leyde, pour donner à cette sorte de réservoir électrique une capacité plus grande.

Pour déterminer la tension (potentiel), on se servait d'un électroscope à feuilles d'or et à cercle divisé, dont la boule était munie d'une tringle métallique venant se terminer à une certaine distance du plateau P. Cet électroscope s'électrisait ainsi, par influence, d'une quantité d'électricité proportionnelle à celle du plateau P, à condition toutefois que l'instrument ne prît pas une charge permanente par communication directe : on s'en assurait en vérifiant que les pailles revenaient exactement au contact, quand le plateau et la machine étaient ramenés à l'état neutre. Si l'électroscope, au lieu d'être soumis à l'influence d'un conducteur de grandes dimensions, était placé dans le voisinage des tringles métalliques servant aux communications, il recevrait de l'électricité directement sous forme d'aigrettes, et il acquerrait alors une charge permanente qui rendrait toute mesure impossible.

467. Pour vérifier que la charge de l'électroscope est bien proportionnelle à celle du plateau, et pour déterminer en même temps une table de graduation de l'instrument, M. Gaugain fit quelques expériences préliminaires. Le plateau P fut électrisé jusqu'à ce que l'électroscope marquât 30°, puis isolé. On le toucha alors avec un large plan d'épreuve qu'on ramenait à l'état neutre après chaque contact, et on observa le nombre de fois qu'il fallait répéter cette opération pour abaisser successive-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. VIII, p. 75.

ment la déviation des pailles à des valeurs différentes, comme l'indique le tableau :

NOMBRE DES CONTACTS N	DÉVIATION DE L'ÉLECTROSCOPE
17	25°
33,5	20
53,5	15
80	10
115,5	5

On fit ensuite communiquer le plateau avec l'électroscope et, ayant chargé l'ensemble de façon que la déviation des feuilles fût encore de 30°, on détermina, de même, le nombre des contacts du plan d'épreuve nécessaires pour obtenir les mêmes divergences que précédemment. On obtint ainsi :

NOMBRE DES CONTACTS N′	DÉVIATION DE L'ÉLECTROSCOPE	$\frac{N}{N'}$
12,5	25°	1,36
24	20	1,39
38,5	15	1,39
58,5	10	1,37
84,5	5	1,37

Les nombres de contacts N et N′ étant proportionnels, il en résulte que la charge ou la tension (potentiel) de l'électroscope est proportionnelle à la charge du plateau, soit qu'il y ait ou non communication entre ces deux corps.

Si l'on remarque en outre que, par suite des différents contacts opérés avec le plan d'épreuve, les charges du plateau varient comme les termes d'une progression géométrique décroissante, on a par ces expériences le moyen de former une table de graduation de l'électroscope, en admettant qu'il y a proportionnalité entre les tensions et les déviations jusqu'à 10°.

468. Cela fait, on éloignait l'électroscope à une distance con-

venable; on rétablissait la communication du plateau avec la boule de décharges et la machine, et, manœuvrant cet appareil de manière à obtenir une succession d'étincelles entre les boules, on notait dans chaque cas la déviation maximum des feuilles de l'électroscope, d'où l'on déduisait la tension correspondante, comme on le voit dans les expériences qui suivent :

CORPS ENTRE LESQUELS SE PRODUIT LA DÉCHARGE	DISTANCE EXPLOSIVE d	TENSION V	$\frac{V}{d}$
2 boules de laiton de 15^{mm} de diamètre.	2^{mm}	4°	2
	4	8	2
	8	15	1,87
	16	22	1,37
2 boules de laiton de 10^{mm} de diamètre.	2	4	2
	4	8	2
	8	12,5	1,56
	16	17	1,06.
Boule positive de 3^{mm} de diamètre. Boule négative de 10^{mm}.	1	8,5	8,5
	2	14	7
	4	19,5	4,9
Boule positive de 3^{mm} de diamètre. Disque négatif de 35^{mm} de diamètre.	1	8	8
	2	11,5	5,75
	4	16	4
	8	20	2,5

Ce tableau montre encore que, pour les petites distances entre des boules égales, la distance explosive et la tension sont à peu près proportionnelles; mais le désaccord devient manifeste pour les grandes distances, et le rapport de la tension à la distance explosive diminue rapidement. Le changement est bien plus marqué quand les deux boules sont de diamètres différents, et surtout quand la décharge a lieu entre une boule et un plateau. La distance maximum pour laquelle se vérifie la loi de proportionnalité est encore ici de 4 ou 5 millimètres, résultat conforme aux observations de M. Riess.

469. Une expérience très-simple permet d'ailleurs de démontrer, sans aucune mesure de potentiels, que la loi de proportion-

nalité est rapidement en défaut. M. Gaugain fait communiquer la machine avec deux boules de métal A et B, la première de 10 millimètres de diamètre, et la seconde de 20 millimètres. En face de ces deux boules on établit séparément deux autres boules A′ et B′, la première de 20 millimètres et la seconde de 10 millimètres. Dans ces conditions, on sait qu'à distances égales entre les boules A et A′ d'une part, B et B′ d'autre part, la décharge passera de préférence entre les deux premières ; mais on peut, en laissant constante la distance AA′, modifier la seconde de façon que l'étincelle passe indifféremment d'un côté ou de l'autre. En fait, on n'arrive jamais à établir cet équilibre d'une manière absolue, mais il suffit de changements très-faibles dans les distances pour que l'étincelle éclate de préférence entre l'une ou l'autre paire de boules. On a ainsi obtenu :

DISTANCES ÉQUIVALENTES ENTRE LES BOULES		RAPPORT
A ET A′	B ET B′	
20mm	10mm	2
10	8	1,25

Le rapport des distances équivalentes n'étant pas constant, il en résulte que ce rapport ne peut pas d'une manière générale être une mesure du rapport des potentiels.

470. M. Gaugain a fait aussi quelques expériences à des distances très-faibles. Nous avons déjà dit que, dans une pile électrique ouverte, les deux pôles ont une différence de potentiel constante, et que cette différence de potentiel se rétablit en un temps très-court, aussitôt qu'après avoir fermé la pile ou produit une étincelle entre les pôles, on maintient de nouveau la pile ouverte. Cette différence de potentiel est d'ailleurs exactement proportionnelle au nombre des éléments qui constituent la pile. M. Gaugain s'est servi d'une pile de Pulvermacher, dont l'un des pôles communiquait avec le sol et l'autre avec un disque de métal situé en regard d'une pointe conductrice non isolée que l'on pouvait éloigner ou rapprocher à l'aide d'une vis micromé-

trique. Comme les étincelles qui se produisent dans ces conditions ne sont pas visibles, il mettait le disque en communication conductrice avec un électroscope à feuilles d'or, et les décharges se manifestaient par une agitation particulière des feuilles.

On pouvait les rendre plus distinctes encore en ralentissant le mouvement de l'électricité; il suffit de relier le pôle isolé de la pile avec l'électroscope par un fil de coton, et l'électroscope au disque par un conducteur. Avec cette disposition, la divergence des feuilles d'or diminue subitement au moment de la décharge, puis augmente lentement, jusqu'à ce qu'elle ait repris sa valeur primitive et qu'elle éprouve une nouvelle chute. On éloigne alors la pointe jusqu'à ce que les feuilles d'or soient absolument immobiles : à ce moment des étincelles cessent de se produire. Voici quelques expériences :

NOMBRE D'ÉLÉMENTS N	DISTANCE EXPLOSIVE d	$\frac{N}{1000\,d}$
	mm.	
1140	0,26	4,38
780	0,058	13,45
540	< 0,001	> 540

Avec la pile de 540 éléments il n'y eut pas d'étincelles, même à la distance d'un millième de millimètre. Ici encore, comme dans les expériences de M. Thomson (465), le rapport de la différence des potentiels à la distance explosive augmente très-rapidement quand la distance devient très-faible.

471. Expériences de MM. Wiedemann et Rühlmann. — MM. Wiedemann et Rühlmann (1), dans un travail important sur le passage de l'électricité à travers les gaz, ont étudié accidentellement la relation qui existe entre la charge électrique et la distance explosive. La disposition de leur appareil est ingénieuse et mérite d'être indiquée. L'excitateur est formé d'un cylindre de laiton dans lequel pénètrent deux tiges de métal isolées, et où l'on peut introduire des gaz différents à une pression connue;

1) *Pogg. Annal.*, t. CXLV, p. 235 et 364. — *Journal de Physique*, t. I, p. 259.

deux petites glaces en regard disposées sur les parois latérales permettent de voir les boules métalliques qui terminent les tiges. Ce cylindre sert en outre d'écran électrique et soustrait les boules à toutes les influences extérieures qui pourraient modifier la production des étincelles. Les branches de cet excitateur sont mises en communication avec les deux pôles de la machine de Holtz, et sur le trajet d'une de ces communications est installé un galvanomètre à miroir par lequel on mesure d'une manière continue le débit de la machine. Comme la distance des boules a toujours été assez petite et la pression du gaz très-faible, les étincelles se succédaient rapidement, et l'on eut recours, pour les observer, au miroir tournant de M. Wheatstone. Seulement la méthode ordinaire ne donne pas de bons résultats, parce que les décharges ne partent pas toujours entre les mêmes points et qu'elles ne sont pas exactement périodiques, sans doute à cause de la variation de distance des plateaux de la machine pendant un tour complet.

Pour obvier à ces difficultés, le miroir a été installé sur l'arbre même de rotation de la machine, de sorte qu'en regardant dans ce miroir, d'un point fixe, on n'observait que les décharges dues au mouvement du plateau dans une position déterminée et toujours la même à chaque révolution. L'inconvénient résultant de l'instabilité des images disparaissait par l'emploi d'une lunette héliométrique, dont l'objectif était coupé en deux moitiés, l'une fixe et l'autre mobile par une vis micrométrique, suivant un plan perpendiculaire au milieu de la distance des deux boules. La machine étant en action et les deux moitiés de l'objectif dans leur situation normale, on apercevait dans la lunette, en visant le miroir, au moins deux traits fins lumineux correspondant à deux étincelles successives. En faisant mouvoir l'une des moitiés de l'objectif, chacun des traits se divisait en deux, et l'on faisait coïncider l'image de droite de l'un d'eux avec l'image gauche de l'autre. Une fois cette coïncidence établie entre les deux images, elle se maintenait malgré les oscillations des étincelles ; on produisait de nouveau la coïncidence en sens inverse, et le déplacement total de l'objectif mobile permettait de calculer la distance angulaire des images de deux étincelles consécutives.

472. On reconnut d'abord que la coïncidence des images de deux étincelles se maintient, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, et que l'intensité du courant qui passe dans le galvanomètre est proportionnelle à la vitesse de rotation ; il en résulte que l'intervalle de deux étincelles successives correspond toujours au même déplacement du plateau, et que la quantité d'électricité qui s'écoule dans chacune des décharges est constante. L'angle apparent de deux étincelles successives, ou le déplacement de l'objectif mobile nécessaire pour passer de l'une des coïncidences à l'autre, est donc, dans chaque série d'expériences, proportionnel à la quantité d'électricité relative à chaque étincelle.

MM. Wiedemann et Rühlmann n'ont étudié l'influence de la charge sur la distance explosive qu'entre deux boules de métal dont l'une avait $15^{mm},8$ de diamètre, et l'autre $2^{mm},65$; la distance de ces boules a varié seulement de $22^{mm},5$ à 3 millimètres. La pression de l'air renfermé dans le cylindre de l'excitateur était évaluée par un manomètre à mercure et elle est restée comprise entre les limites de 20 à 60 millimètres; cette pression était d'ailleurs maintenue constante pour chaque série d'expériences. En désignant par y l'angle apparent de deux étincelles successives ou le déplacement de l'objectif, lequel est proportionnel à la charge électrique, et d la distance explosive, MM. Wiedmann et Rühlmann ont trouvé que les expériences peuvent être représentées d'une manière très-exacte par une expression de la forme

$$y = A + Bd^4, \qquad (1)$$

lorsque la plus grosse boule est négative, et par une expression différente

$$y = C - \frac{D}{d^2}, \qquad (2)$$

si la plus grosse boule est au contraire positive; les constantes A, B, C et D dépendent de la pression.

Voici, par exemple, les valeurs numériques de ces coefficients pour trois pressions différentes.

PRESSION DU GAZ	GROSSE BOULE NÉGATIVE		GROSSE BOULE NÉGATIVE	
	A	B	C	D
55mm	4,24	0,0225	8,76	15,68
40	3,59	0,0175	7,09	12,85
25	2,94	0,0125	5,42	10,02

473. Il est possible que ces formules, qui renferment deux constantes arbitraires, satisfassent aux expériences d'une manière convenable, mais la véritable loi du phénomène ne saurait être exprimée sous cette forme. Pour s'en assurer, il suffit de calculer par ces formules la charge électrique qui conviendrait à quelques distances explosives sortant à peine des limites entre lesquelles sont comprises les expériences de MM. Wiedemann et Rühlmann, comme nous l'avons fait dans le tableau suivant : la première série correspond à la formule (1), et la seconde à la formule (2).

DISTANCE EXPLOSIVE d	PRESSION DE 55mm		PRESSION DE 25mm	
	CHARGE y	$\frac{y}{d}$	CHARGE y	$\frac{y}{d}$
1mm	4,26	4,26	2,95	2,95
3	4,44	1,48	3,05	1,02
5	4,80	0,96	3,25	0,65
10	6,49	0,65	4,19	0,42
15	9,30	0,62	5,75	0,32
20	13,24	0,66	7,94	0,40
25	18,50	0,74	10,75	0,43
1	− 6,92	− 6,92	− 4,60	− 4,60
3	+ 3,53	+ 1,18	+ 2,08	0,69
5	5,62	1,12	3,42	0,68
10	7,19	0,72	4,42	0,44
15	7,72	0,51	4,76	0,32
20	7,98	0,40	4,92	0,25
25	8,13	0,32	5,02	0,20

Je n'insiste pas sur ce résultat évidemment absurde, que la seconde formule conduit à une valeur négative de la charge pour une distance explosive d'un millimètre, distance qui n'est cependant pas très-éloignée de celles qui ont été observées ; mais il est clair que le rapport de la charge à la distance explosive ne peut pas éprouver des variations aussi grandes que celles qui sont indiquées par ce tableau, ni présenter un minimum, comme on le voit dans les nombres de la première série pour la distance de 15 millimètres.

Il résulte aussi de ces expériences qu'aux pressions très-faibles et pour des distances explosives comprises entre 3 et 20 millimètres, la différence de potentiel nécessaire pour provoquer la décharge croît moins rapidement que la distance explosive, comme on l'avait observé par les recherches antérieures faites à la pression ordinaire. D'ailleurs, le cylindre qui entourait les boules avait des dimensions trop faibles et les conducteurs n'étaient pas suffisamment éloignés de toute communication avec le sol, de sorte que les fuites devaient croître rapidement quand on augmentait la distance explosive.

474. Recherches de M. Gaugain sur la densité explosive. — Pour qu'une décharge ait lieu entre deux conducteurs, il faut que la résistance du milieu ambiant soit vaincue par la pression électrique; il semble donc qu'il soit moins utile de connaître la différence des potentiels que la densité électrique au point où se produit l'étincelle. Les expériences de M. Thomson donnent la solution de cette question dans le cas particulier de deux plateaux parallèles, mais la distance explosive est restée trop faible pour qu'il soit possible d'en tirer aucune conclusion générale. On pourrait aussi déduire des expériences faites avec des boules égales, la relation qui existe entre la distance explosive et la densité des points les plus voisins ; il faudrait pour cela reprendre les calculs de Poisson et les réduire en tables qui donneraient d'une manière générale les densités électriques des points les plus rapprochés, en fonction de la distance des sphères et de la différence de leurs potentiels ; ce problème n'a été résolu jusqu'ici que pour des valeurs numériques particulières.

M. Gaugain a étudié cette question à l'aide des condensateurs formés de cylindres concentriques dont la théorie peut être éta-

blie facilement. Nous avons vu (175) que la charge électrique M d'un cylindre de longueur L et de rayon R_1 entouré par un cylindre concentrique de rayon intérieur égal à R_2 est, en désignant par V la différence des potentiels des deux armatures de ce condensateur,

$$M = \frac{VL}{2} \frac{1}{l.\frac{R_2}{R_1}}.$$

La densité électrique μ sur le cylindre intérieur est

$$\mu = \frac{M}{2\pi R_1 L} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{V}{R_1 l.\frac{R_2}{R_1}};$$

il suffit donc de déterminer par expérience la différence de potentiel nécessaire pour produire des étincelles entre les deux cylindres, et l'on en déduira aisément la densité.

Comme le calcul suppose la longueur des cylindres indéfinie, et que la densité électrique tend toujours à devenir plus grande aux extrémités des cylindres, nécessairement limités dans la pratique, il faut éliminer cette cause d'erreur. M. Gaugain a reconnu que, si le cylindre intérieur dépasse de 20 ou 25 centimètres le cylindre extérieur et si les bouts de ce dernier sont munis de bourrelets métalliques ou simplement de bourrelets de cire molle, les étincelles ne se produisent pas aux extrémités. D'autre part, l'expérience indique que la tension explosive diminue, en général, quand la longueur du cylindre extérieur augmente, mais, à partir d'une certaine limite, la tension devient constante : il suffit pour cela que la longueur soit au moins le double du diamètre. En prenant les précautions indiquées par ces essais préliminaires, on pourra donc considérer les formules comme applicables.

475. La disposition des expériences était la même que précédemment. Le cylindre extérieur du condensateur était relié avec le sol. Le cylindre intérieur communiquait, d'une part avec la machine, et, d'autre part, avec un plateau conducteur isolé, lequel agissait par influence sur un électroscope à feuilles d'or situé à une certaine distance. On faisait tourner la machine d'une ma-

nière continue et assez rapidement pour que la divergence des feuilles de l'électroscope demeurât à peu près constante malgré les décharges qui se produisaient par intermittences entre les deux cylindres, soit en aigrettes, soit par des étincelles. La différence de potentiel est en effet sensiblement la même, comme nous le verrons plus loin, pour ces deux formes de la décharge. La déviation des pailles indiquait dans les différents cas le potentiel du cylindre intérieur.

M. Gaugain a constaté d'abord que l'épaisseur explosive, c'est-à-dire la densité électrique sur la surface du cylindre intérieur, nécessaire pour provoquer la décharge, est indépendante du diamètre du cylindre extérieur. Ainsi, on a obtenu dans deux séries d'expériences :

CYLINDRE INTÉRIEUR $2R_1$	CYLINDRE EXTÉRIEUR $2R_2$	DÉVIATION DES PAILLES	POTENTIEL V	$\frac{V}{2R_1 log. \frac{R_1}{R_2}}$
10mm	20mm	8°,5	43	14,2
»	40	17,3	85,4	14
»	60	22,5	113,2	14,5
1mm	20	7,5	39,1	30
»	100	12	60,7	30,3

Ce tableau montre aussi que la production de l'étincelle ne dépend pas simplement de la densité électrique. L'épaisseur explosive diminue quand le diamètre du cylindre intérieur augmente, et la loi du phénomène est représentée d'une manière suffisante par la formule empirique

$$\mu = \alpha + \frac{\beta}{\sqrt[5]{R_1}},$$

comme on le voit par les expériences suivantes, pour lesquelles la densité a été calculée en donnant aux constantes α et β les valeurs

$$\alpha = 2{,}58,$$
$$\beta = 25{,}62.$$

CYLINDRE INTÉRIEUR $2R_1$	DENSITÉ EXPLOSIVE		DIFFÉRENCE
	OBSERVÉE	CALCULÉE	
30mm	11	10,81	0,19
10	14,5	14,50	0
5	16,8	17,56	0,76
1	28,2	28,20	0
0,27	45,1	42,58	2,52
0,20	49,1	46,71	2,39
0,11	60	55,80	4,20

La formule empirique s'accorde d'une manière remarquable avec l'expérience, quoiqu'elle cesse d'être exacte pour des diamètres très-petits, mais elle n'a pas le caractère d'une loi générale et ne convient qu'à la forme des conducteurs employés.

476. **Vérification de la loi des batteries par les décharges.** — J'indiquerai encore une disposition expérimentale qui permet de démontrer facilement dans un cours que la production d'une étincelle entre deux conducteurs donnés, à une distance constante, ne dépend que de la différence des potentiels des deux conducteurs. Ces expériences peuvent être considérées comme une vérification de la théorie des batteries et des cascades de bouteilles de Leyde. Comme la machine de Holtz donne beaucoup plus d'électricité que les anciennes machines à frottement, et qu'elle a deux pôles qui fournissent les deux espèces d'électricité, c'est l'instrument dont il convient le mieux de se servir.

Les deux pôles d'une machine de Holtz sont mis en communication séparément avec les deux armatures d'une batterie isolée, l'un des pôles directement, et l'autre par l'intermédiaire d'une bouteille de Lane. Les deux armatures de la batterie sont en même temps reliées aux deux boules d'un excitateur. Supposons, par exemple, qu'on opère avec une batterie de six bouteilles : on règle les distances explosives de la bouteille de Lane et de l'excitateur de façon que 30 étincelles de la bouteille de Lane soient nécessaires pour produire une décharge dans l'excitateur ou, plus exactement, à cause des résidus qui retardent la première décharge, qu'il y ait toujours 30 étincelles de la bou-

teille de Lane entre les décharges successives de l'excitateur. On recommence alors l'expérience en supprimant successivement 1, 2, 3, 4 et 5 bouteilles de la batterie, et l'on constate qu'entre deux décharges de l'excitateur, il se produit 25, 20, 15, 10 et 5 étincelles de la bouteille de Lane, c'est-à-dire que la charge totale de la batterie est proportionnelle au nombre des bouteilles, ou bien que la différence des potentiels des deux armatures reste constante. Rien n'est changé au phénomène, si l'on met en communication avec le sol l'une des armatures de la batterie; le potentiel de cette armature est alors constamment nul, et celui de l'autre est doublé sans que la différence soit modifiée. Toutefois, pour des décharges à grande distance, il vaut mieux isoler les deux armatures, afin que les potentiels absolus soient moins élevés et la déperdition plus faible.

MM. Widemann et Rühlmann avaient constaté, au contraire, dans leurs expériences, que la quantité d'électricité nécessaire pour provoquer la décharge devenait plus grande quand l'un des pôles de la machine de Holtz n'était pas isolé, surtout si c'était le pôle négatif, et que cette charge explosive variait entre des limites assez grandes suivant que le cylindre qui entourait les boules était isolé ou mis en communication avec l'un ou l'autre des deux pôles [1]; mais ces différences peuvent être attribuées, au moins en partie, à l'isolement insuffisant des conducteurs et à l'accroissement des fuites.

477. Remplaçons maintenant la batterie par une cascade que nous supposerons de quatre bouteilles (fig 175); les armatures extrêmes A et E étant mises en communication par des tringles R et R' avec les pôles de la machine de Holtz et avec les branches de l'excitateur comme précédemment, réglons les distances explosives de façon que 6 étincelles de la bouteille de Lane produisent une décharge de l'excitateur. Si l'on réduit successivement la cascade à 3, 2 et 1 bouteilles, en posant l'une des tringles R sur les communications B, C et D de deux armatures voisines, on constatera que les décharges de l'excitateur sont successivement produites par 8, 12 et 24 étincelles de la bouteille de Lane. La charge de la cascade est donc en raison inverse

[1] *Loc. citato.*, p. 376.

du nombre des bouteilles ; comme on a démontré (190) que la différence de potentiel des armatures extrêmes d'une cascade est proportionnelle à la charge et au nombre des bouteilles, il en résulte que, dans l'expérience précédente, la différence de potentiel était constante. Avec cette disposition, il sera possible d'écarter beaucoup les boules de l'excitateur, parce qu'on peut établir sur les armatures extrêmes d'une batterie en cascade une

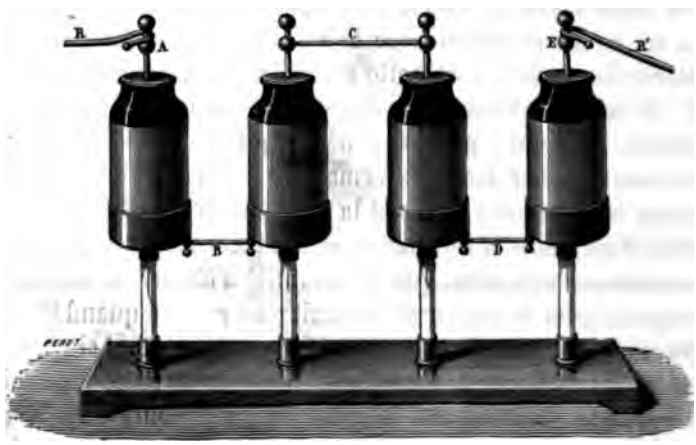


Fig. 175.

grande différence de potentiel sans que la batterie se décharge d'elle-même ; mais alors l'explosion ne pourra plus être obtenue avec une ou même deux bouteilles.

478. **Influence de la forme des conducteurs.** — Les expériences précédentes ont déjà montré que la forme des conducteurs entre lesquels s'effectue la décharge modifie la distance explosive ; j'en citerai encore quelques exemples. On a mis les deux armatures d'une batterie isolée en communication séparément avec les deux pôles d'une machine de Holtz, l'une directement et l'autre par l'intermédiaire d'une bouteille de Lane. D'autre part, chacune des armatures communiquait aussi avec une des branches d'un excitateur, et l'on comptait le nombre des étincelles de la bouteille de Lane qui se produisaient entre deux décharges successives de l'excitateur. En terminant les branches de cet excitateur par des pièces de formes différentes, on a constaté que le rapport de la densité moyenne de la batterie, ou du

potentiel, à la distance explosive variait comme l'indiquent les nombres suivants :

DISTANCE EXPLOSIVE	FORME DES CONDUCTEURS			
	BOULES DE 33^{mm} DE DIAMÈTRE	BOULES DE 52^{mm} DE DIAMÈTRE	PLATEAUX DE 76^{mm}	PLATEAU POSITIF; BOULE DE 20^{mm} NÉGATIVE
1^{mm}	6,4	»	»	»
2	6,4	»	1,96	2,96
4	6	5,8	»	3,2
6	5,35	5,34	2,76	»
10	5,2	5,2	2,93	2,6
15	5,18	5,14	2,5	2,2
20	4,5	»	2,09	»
25	»	»	»	1,91
30	»	»	1,88	1,75

Malgré quelques irrégularités dans les résultats, ce tableau montre clairement que, pour des boules de 3 ou 5 centimètres, la distance explosive est sensiblement la même, mais la loi du phénomène est tout à fait modifiée quand l'étincelle se produit entre deux plateaux. Dans ce cas, du moins avec les dimensions employées, le potentiel croît d'abord plus rapidement que la distance explosive et le rapport de ces deux quantités varie peu entre des limites assez étendues; d'autre part, la quantité d'électricité nécessaire pour la décharge est moitié moindre qu'entre les boules. Entre une boule négative et un plateau positif, la décharge se fait à peu près de la même manière qu'entre deux plateaux. Il résulte de là que la forme même de la loi qui règle les distances explosives dépend de la forme des conducteurs.

479. **Expériences avec des potentiels très-élevés.** — Les batteries ordinaires ne permettent pas d'obtenir de grandes distances explosives parce qu'elles se déchargent spontanément ou se brisent, de sorte qu'il devient bientôt impossible d'évaluer par la bouteille de Lane les quantités d'électricité ou les différences de potentiel; d'autre part, tout appareil de mesure basé sur l'équilibre électrique cesse de fonctionner d'une manière régulière, quand les conducteurs se déchargent fréquemment par des étin-

celles. On peut, à l'aide d'une batterie de bouteilles disposées en cascade d'une manière particulière, équilibrer, par une somme de différences de potentiel plus faibles, une différence de potentiel trop considérable pour être évaluée directement.

Pour cela, on prend une série de bouteilles de Leyde A_1, A_2, A_3,... A_6, réunies en cascade, comme l'indique la figure 176, par des fils d'un gros diamètre entourés de gutta-percha. Au-dessus des boules qui terminent les armatures intérieures de ces bouteilles est une baguette de verre DC portant une série de boules de métal B_1, B_2,... B_6, placées exactement en regard des précé-

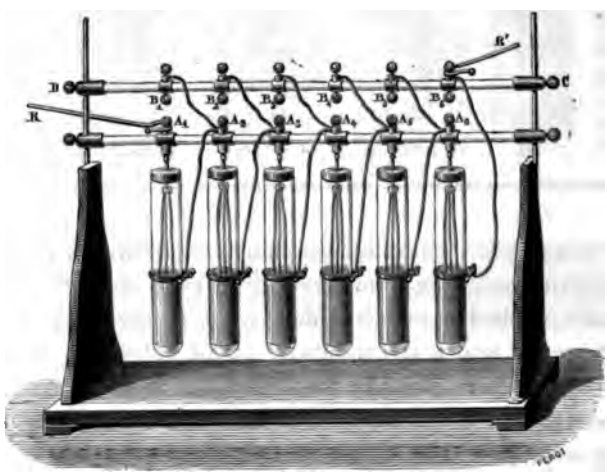


Fig. 176.

dentes ; la première boule B_1 est réunie à l'armature intérieure de la seconde bouteille et, par suite, à l'armature extérieure de la première ; il en est de même pour les suivantes. Les choses étant ainsi disposées, on met l'armature intérieure A_1 de la première bouteille en communication par une tringle R avec un conducteur P, et l'armature extérieure B_6 de la dernière en communication avec un autre conducteur P′ par une tringle R′. Si, la batterie étant à l'état neutre, on établit entre les conducteurs P et P′ une certaine différence de potentiel, les n bouteilles de la batterie seront électrisées par influences successives, et il se produira entre les deux armatures de chacune d'elles une différence de potentiel n fois plus faible.

Supposons que toutes les boules correspondantes, A_1 et B_1, A_2 et B_2, etc., soient également distantes l'une de l'autre; si la différence de potentiel est suffisante, il se produira simultanément entre toutes ces boules des étincelles identiques. On réunit alors les conducteurs P et P′ séparément avec les deux branches d'un excitateur, et l'on détermine par tâtonnements la distance D à laquelle il faut les écarter pour que la décharge se produise à peu près indifféremment par l'excitateur ou par la cascade de bouteilles. En désignant par V la différence de potentiel nécessaire pour qu'une étincelle ait lieu entre les boules A_1 et B_1 de la batterie, on voit que, dans le cas de la figure, la différence de potentiel nécessaire pour vaincre la distance D des branches de l'excitateur sera égale à 6V. On supprime ensuite une des bouteilles de la batterie en posant simplement la tringle R′ sur le conducteur B_5, et la nouvelle distance explosive D′ de l'excitateur, équivalente à la batterie, correspondra à la différence de potentiel 5V; et ainsi de suite. On déterminera ainsi les distances explosives D, D′,... qui correspondent à des différences de potentiel variant comme les nombres 6, 5, 4, 3, 2 et 1. Si la plus petite de ces distances est comprise entre les limites (de 1 à 5 millimètres, par exemple) pour lesquelles la loi de proportionnalité soit suffisamment approchée, on aura immédiatement la valeur de 6V. Sinon, on abaissera un peu la baguette de verre supérieure DC, et on la fixera dans une autre position, de manière à obtenir une nouvelle série de mesures empiétant sur la première. On trace alors une courbe en prenant pour abscisses les distances explosives D,D′..., observées dans une série d'expériences, et pour ordonnées des longueurs proportionnelles aux différences de potentiels, c'est-à-dire variant comme les nombres 6, 5, 4.... On construit ensuite la portion de courbe relative à une autre série d'expériences, en représentant par une même ordonnée la différence de potentiel qui correspond à une distance explosive observée dans les deux cas.

En fait, le phénomène est extrêmement régulier : les courbes ainsi construites sont à peu près rectilignes dans le voisinage de l'origine, mais elles se courbent bientôt en tournant leur concavité vers l'axe des abscisses et paraissent tendre vers une asymptote horizontale; les différentes expériences, dont nous

extrayons le tableau qui suit, s'accordaient à $\frac{1}{20}$ près. Les deux conducteurs que nous avons appelés P et P′ étaient les deux pôles d'une machine de Holtz; les deux boules de l'excitateur entre lesquels se produisait l'étincelle avaient 3 centimètres de diamètre, et on a pris pour unité la différence de potentiel qui correspond à une distance explosive d'un millimètre.

DISTANCE EXPLOSIVE	DIFFÉRENCE DE POTENTIEL	DISTANCE EXPLOSIVE	DIFFÉRENCE DE POTENTIEL
1mm	1	50mm	17,3
4	4	60	18,5
5	4,9	70	19,6
10	8,3	80	20,5
15	10,3	90	21,1
20	11,8	100	21,7
25	13	110	22,1
30	14	120	22,5
40	15,9	150	23,3

On voit qu'à partir d'une certaine distance, le potentiel varie extrêmement peu et paraît tendre vers une limite. Ce résultat pouvait être prévu, car on conçoit que, si un corps conducteur complétement isolé reçoit une charge suffisante, l'électricité devra s'échapper dans l'air quelle que soit la distance des corps étrangers, et, dans ce cas, la longueur de l'étincelle serait pour ainsi dire illimitée. Cette circonstance est importante à signaler: ainsi, on commettrait une grave erreur en considérant la puissance d'une machine électrique comme proportionnelle à la longueur des étincelles qu'on en peut tirer; d'autre part, malgré la distance prodigieuse à laquelle se produisent les éclairs, on ne peut pas en conclure que le potentiel d'un nuage électrisé soit hors de proportion avec ceux qu'on obtient par les machines électriques.

480. **Mesures absolues.** — Il est souvent difficile de comparer entre elles des expériences différentes d'électricité, parce que les observateurs négligent d'indiquer complétement les dimensions de leurs appareils et que, d'ailleurs, la valeur relative de deux instruments ne peut être déterminée en général que par

une comparaison directe. Gauss (1) et W. Weber (2) ont introduit dans l'étude de l'électricité et du magnétisme l'usage des unités absolues, et toute détermination expérimentale de quelque exactitude doit être rapportée à des unités convenablement définies. Nous adopterons ici le milligramme et le millimètre.

D'après cela, *une quantité d'électricité égale à l'unité est une quantité telle, qu'en agissant sur une quantité égale placée à une distance d'un millimètre, elle produit une répulsion égale à un milligramme.* Le potentiel, étant le quotient d'une quantité d'électricité par une longueur, se trouve ainsi rapporté aux unités principales.

Le tableau que nous avons donné au n° 465 a été déduit des résultats de M. Thomson et rapporté au milligramme et au millimètre. Il résulte, par exemple, de ces expériences que, pour provoquer une étincelle entre deux plateaux parallèles, il faut une différence de potentiel donnée en valeur absolue par les nombres suivants :

DISTANCE EXPLOSIVE	DIFFÉRENCE DE POTENTIEL
mm.	
0,025	1,35
0,05	1,85
0,1	2,70
0,5	7,30
1,0	12,40
1,5	17,40

481. J'ai fait quelques déterminations analogues sur la distance explosive entre deux sphères. Comme les électromètres statiques exigent toujours un certain temps pour arriver à l'équilibre, la détermination du potentiel d'un conducteur qui donne constamment des étincelles est très-difficile, parce que l'appareil de mesures éprouve des soubresauts continuels.

Pour éviter cette difficulté, j'ai employé une disposition qu'on peut appeler un *trop-plein électrique*. L'un des pôles P' d'une

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. LVII, p. 5.
(2) *Elektrodynamische maasbestimmungen*, Leipzig, 1846.

machine de Holtz étant réuni au sol, l'autre pôle P fut mis en communication, d'une part avec une pointe placée à une certaine distance d'un conducteur non isolé B et, d'autre part, avec la sphère S (fig. 142) de l'appareil à oscillations décrit au n° 310. La tige qui reliait cette sphère à la machine passait par une ouverture ménagée dans un grand écran conducteur communiquant avec le sol, pour éviter l'action directe de la machine sur l'aiguille oscillante. Quand on fait tourner la machine d'une manière convenable, le pôle P et les conducteurs avec lesquels il communique s'électrisent, mais, aussitôt que le potentiel a atteint une certaine limite, la pointe laisse échapper des aigrettes continues qui maintiennent le niveau électrique sensiblement constant; si même l'électricité afflue parfois d'une manière trop rapide et provoque une étincelle entre la pointe et le conducteur opposé, la chute de potentiel ne dure qu'un instant très-court et la régularité des oscillations n'en est pas sensiblement troublée. On détermine ainsi, en valeurs absolues, les potentiels maxima V, V', V''..., que puisse garder l'appareil, lorsque la pointe est maintenue à des distances différentes D, D', D''... du conducteur placé en regard.

Cela fait, on supprime l'appareil de mesures, puis on relie le pôle P, d'une part avec la pointe et, d'autre part, avec une des boules d'un micromètre à étincelles dont l'autre boule communique avec le sol ; on détermine alors, pour les distances différentes D, D', D''... de la pointe au conducteur, les distances équivalentes d, d', d''... entre les boules du micromètre, c'est-à-dire des distances telles que les étincelles passent à peu près indifféremment d'un côté ou de l'autre. Cette table de comparaison donne la distance explosive d entre deux boules pour une valeur connue V du potentiel. Ici encore on admet d'une manière implicite que les aigrettes et les étincelles exigent la même différence de potentiel pour se produire entre deux conducteurs déterminés, et que ces deux formes de la décharge ne diffèrent que par la quantité d'électricité mise en jeu ; c'est là une propriété que nous avons déjà signalée et sur laquelle nous reviendrons plus tard.

Voici la moyenne des résultats obtenus par cette méthode dans plusieurs séries d'expériences; les deux boules du micromètre

avaient 22 millimètres de diamètre, et l'appareil était chargé par le pôle positif de la machine de Holtz.

DISTANCE EXPLOSIVE d	VALEUR ABSOLUE DU POTENTIEL V	$\frac{V}{d}$
1mm	18,5	18,5
5	90	18
10	165	16,5
15	195	13

On voit encore que le potentiel croît moins rapidement que la distance explosive ; les nombres obtenus sont d'ailleurs très-sensiblement proportionnels à ceux du tableau du n° 479. Pour la distance d'un millimètre, la valeur observée est une fois et demie aussi grande que celle qui est nécessaire, d'après M. Thomson, à la production d'une étincelle entre deux plateaux, ce qui est parfaitement d'accord avec l'influence connue (478) de la forme des conducteurs.

482. **Pression électrostatique pour de grandes distances explosives.** — Enfin, si l'on admet que le potentiel nécessaire pour provoquer l'étincelle à une très-grande distance soit, comme nous l'avons trouvé précédemment (479), 25 ou 30 fois plus grand que pour la distance d'un millimètre, ce potentiel maximum sera inférieur à 600. Il est intéressant de voir quelle est alors la pression de l'électricité sur l'air ambiant. Avec un pareil potentiel, la pression électrique sur l'unité de surface serait, en appelant R le rayon de la sphère que l'on supposera éloignée de tout conducteur,

$$2\pi\mu^2 = 2\pi \frac{V^2R^2}{(4\pi R^2)^2} = \frac{1}{8\pi R^2} V^2.$$

En remplaçant V par 600 et R par 22 millimètres, on trouve

$$2\pi\mu^2 = 29,6.$$

Or, une pression de 30 milligrammes par millimètre carré correspond à 3 grammes par centimètre carré, c'est-à-dire à moins d'un trois centième d'atmosphère. Ainsi, quand le potentiel ab-

solu d'une sphère électrisée est assez élevé pour que cette sphère soit capable de se décharger sur le sol à une très-grande distance, la pression de l'électricité n'est encore qu'une fraction minime de la pression atmosphérique.

483. **Influence de la pression sur la distance explosive. — Expériences de M. Harris.** — Dans le travail que nous avons déjà cité, M. Harris [1] a trouvé que, si l'on place les boules de l'excitateur dans une atmosphère où l'on peut faire varier la pression et qu'on mette ces boules en communication séparément avec les armatures d'une batterie, la quantité d'électricité nécessaire pour produire une étincelle est proportionnelle à la pression, c'est-à-dire que la différence de potentiel est proportionnelle à la pression. Si l'on admet aussi la proportionnalité de la distance explosive à la différence de potentiel, il résulte de là qu'à charge constante la distance explosive doit être en raison inverse de la pression. C'est ce que M. Harris annonce avoir constaté directement, sans donner toutefois les résultats numériques de ses expériences.

484. **Expériences de Masson.** — Masson [2] a vérifié la même loi par la méthode des dérivations. Son appareil était formé de deux tiges de métal terminées en boules, plantées dans le bouchon d'un ballon et isolées par des tubes de verre. On pouvait raréfier l'atmosphère de ce ballon par un robinet latéral et y introduire un gaz quelconque. Les deux tiges communiquaient séparément avec deux boules M et N d'un excitateur. L'un de ces conducteurs étant en communication avec le sol et l'autre avec une machine, on écartait ou rapprochait les boules M N, jusqu'à ce que l'étincelle se produisît indifféremment entre ces boules ou entre celles du ballon. Dans ces conditions, comme l'avait constaté Faraday, l'étincelle a une tendance très-marquée à éclater de préférence entre deux points où elle a déjà passé, peut-être à cause de l'échauffement de l'air et des déchirures du métal ; mais, si l'on établit une interruption sur les conducteurs avant la bifurcation et une autre après, il se produit à chaque explosion 3 étincelles au lieu d'une, et l'équilibre est alors beaucoup plus facile à établir entre les deux appareils. Le tableau qui

(1) *Phil. trans.* (1834), p. 228.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série. t. XXX, p. 41.

suit correspond à des expériences où le gaz renfermé dans le ballon était de l'air atmosphérique. On écartait les boules de l'excitateur à la distance minimum pour que la décharge eût toujours lieu dans le ballon, puis à la distance maximum pour qu'elle se fît toujours entre les branches de l'excitateur. On voit, par les nombres de la dernière colonne, que le rapport de la pression à la distance extérieure est sensiblement constant dans les deux cas.

	PRESSION H	DISTANCE DES BOULES DE L'EXCITATEUR d	$\frac{H}{d}$
L'étincelle passe dans le ballon.	750^{mm}	18,30	4,1
	480	11	4,3
	285	7	4,1
	190	4,8	4,0
L'étincelle passe entre les boules de l'excitateur.	750	22,2	3,34
	555	16,1	3,44
	530	15,5	3,42
	400	11,2	3,57
	370	11,2	3,30
	200	6,2	3,22

La distance d, qui est évaluée en demi-millimètres, est à peu près proportionnelle à la différence des potentiels; il en résulte donc qu'à distance explosive constante, la différence de potentiels est proportionnelle à la pression.

485. **Expériences de M. Knochenhauer.** — La méthode de Masson n'est pas directe et la pression n'a pas varié entre des limites assez étendues pour que la loi puisse être considérée comme bien établie. M. Knochenhauer (1) avait déjà étudié la même question, par la méthode de M. Harris, en mettant simplement les branches de l'excitateur à gaz raréfié en communication avec les armatures d'une batterie dont on mesurait la charge. Si l'on admet que la distance explosive est proportionnelle à la densité, c'est-à-dire au quotient de la charge M par le nombre n des bou-

(1) *Pogg. Ann.* t. LVIII, p. 219.

teilles de la batterie, et qu'elle soit de plus en raison inverse de la pression H, on pourra écrire

$$d = a\frac{M}{Hn}.$$

Il résultera de cette formule que, pour une même distance explosive, le rapport $\frac{M}{Hn}$ doit être constant.

PRESSION H	DENSITÉ ÉLECTRIQUE OBSERVÉE	DIFFÉRENCE DES VALEURS SUCCESSIVES	DENSITÉ CALCULÉE	$\frac{M}{Hn}$
p. 27,4	41.9		41,9	1,53
24,4	37.8	4,1	37,7	1,55
21,4	33.5	4,3	33,5	1,56
18,4	29.1	4,4	29,3	1,58
15,4	25.1	4,0	25	1,63
12,4	20.8	4,3	20,8	1,67
9,4	16.6	4,2	16,6	1,76
6,4	12.2	4,4	12,4	1,90
3,4	8.1	4,1	8,1	2,38

Ce tableau, qui donne les moyennes de cinq séries d'expériences, montre que, pour une diminution de pression de 3 pouces, le rapport $\frac{M}{n}$ diminue toujours d'une quantité à peu près constante. M. Knochenhauer a représenté la valeur de ce rapport par l'expression suivante

$$\frac{M}{n} = 1{,}406\,(H + 2{,}41).$$

Les résultats de la troisième colonne ainsi calculés sont absolument conformes à ceux que donne l'observation; toutefois expériences à faible pression n'ont pas été assez nombreuses la formule indiquerait évidemment une densité électrique grande pour les pressions très-faibles.

Ce qui résulte clairement des nombres de la dernière colc c'est que le rapport de la densité électrique à la pression d'une manière sensible, à mesure que la pression diminue.

486. **Expériences de MM. Wiedemann et Rühlmann.** — Le travail de ces physiciens dont il a déjà été question (471) avait surtout pour but de déterminer l'influence de la pression sur la distance explosive. La charge relative à chaque étincelle était déterminée, comme nous l'avons vu, par la distance angulaire de deux traits successifs vus dans le miroir tournant ; mais, le débit de la machine n'étant pas absolument constant pour une même vitesse de rotation dans une longue série d'expériences, on observait en même temps la déviation du galvanomètre et par une proportion on réduisait la distance des images, c'est-à-dire la charge, à ce qu'elle eût été avec un débit constant.

Voici, par exemple, quelques expériences pour lesquelles la décharge avait lieu dans l'air entre deux boules, l'une positive de $3^{mm},08$ de diamètre, et l'autre négative de $2^{mm},92$, écartées de $9^{mm},95$.

PRESSION DE L'AIR H	DISTANCE DES IMAGES SUCCESSIVES			DIFFÉRENCE	$\frac{H}{y}$
	OBSERVÉE	RÉDUITE y	CALCULÉE		
mm.					
11,9	2,4	2,5	2,6	— 0,1	4,76
16,2	3,6	3,7	3,7	0	4,38
19,4	3,9	4,0	4,2	— 0,2	4,85
25,1	4,5	4,6	4,9	— 0,3	5,52
32,3	5,4	5,5	5,6	— 0,1	5,87
35,4	5,7	5,8	5,9	— 0,1	6,10
39,1	6,0	6,2	6,2	0	6,30
43,4	6,4	6,6	6,5	+ 0,1	6,58
49,8	6,9	7,1	7,0	+ 0,1	7,01
54,9	7,2	7,4	7,5	— 0,1	7,42
61,1	7,7	8,0	7,8	+ 0,2	7,64
65,8	8,1	8,4	8,2	+ 0,2	7,83
71,4	8,7	8,9	8,6	+ 0,3	8,02
82,4	9,1	9,3	9,3	0	8,86
84,6	9,6	9,8	9,5	+ 0,3	8,63
94,6	10,0	10,2	10,2	0	9,27
99,2	10,3	10,5	10,5	0	9,45
104,7	10,4	10,6	10,9	— 0,3	9,88
108,2	11,4	11,2	11,1	+ 0,1	9,66
112,3	11,9	11,7	11,4	+ 0,3	9,60
122,5	12,3	12,1	12,1	0	10,12
129,5	13,2	12,4	12,6	— 0,2	10,40
135,8	13,7	12,9	13,1	— 0,2	10,53
145,1	14,4	13,5	13,7	— 0,2	10,75

MM. Wiedemann et Rühlmann ont calculé leurs expériences par une expression de la forme

$$y = A + BH - \frac{C}{H^2},$$

et, dans l'exemple que nous avons choisi, les coefficients A, B et C avaient pour valeurs

$$A = 3{,}70$$
$$B = 0{,}0687$$
$$C = 282{,}6.$$

L'accord du calcul et de l'observation est satisfaisant, mais la formule employée est purement empirique et ne peut convenir qu'entre les limites de pressions où sont renfermées les expériences; cette formule donne, en effet, une valeur minimum du rapport de la pression à la charge pour la pression de 15 millimètres, et, si on l'applique à une pression de 8 millimètres, on trouve déjà une charge négative. La dernière colonne du tableau montre que la pression croît plus rapidement que la charge électrique, et que le rapport de ces deux quantités tend à devenir constant, ce qui est d'accord avec les observations de M. Knochenhauer.

487. Lorsque la pression augmente de plus en plus au-dessus de la pression atmosphérique, la longueur de l'étincelle pour une même charge diminue constamment. Cette propriété avait déjà été signalée par Döbereiner (1), et M. Cailletet (2) l'a vérifiée récemment pour des pressions considérables. Ainsi, une bobine d'induction de 30 cent. de longueur, alimentée par huit grands éléments Bunsen, n'avait pas une énergie suffisante pour que la décharge franchît un espace de moins de $\frac{1}{2}$ millimètre entre deux fils de platine dans un gaz sec à la pression de 40 ou 50 atmosphères.

488. **Non conductibilité du vide absolu.** — Si l'on rapproche ces expériences de celles de M. Matteucci (42), d'après lesquelles la charge limite d'un corps dans une atmosphère est en raison inverse de la pression, il semble en résulter que, dans un espace

(1) *Schweigger Journ.*, t. LXII, p. 89.
(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXIV, p. 1282.

suffisamment purgé de gaz, aucun corps ne peut rester électrisé et que les étincelles doivent se produire à toute distance. On sait, en effet, depuis les expériences d'Hauksbée, que les étincelles peuvent acquérir une grande longueur dans les gaz très-raréfiés.

Watson en 1751 (1) prit un tube de verre de 3 pieds de long et 3 pouces de diamètre fermé par deux garnitures métalliques dont l'une portait une plaque de métal fixe dans l'intérieur du tube, et l'autre une plaque mobile qu'on pouvait éloigner à volonté de la première. Après avoir raréfié par une machine pneumatique le gaz renfermé dans ce tube, il mit l'une des garnitures en communication avec une machine électrique et l'autre avec le sol, ou bien il plaça ce tube sur le trajet du circuit qui relie les deux armatures d'une bouteille de Leyde. Dans les deux cas, si la pression restante était assez faible, la décharge avait lieu à travers le gaz entre les deux plaques éloignées même de toute la longueur du tube, sous forme d'aigrettes lumineuses ou de lueurs plus ou moins éclatantes. Il répéta ensuite la même expérience d'une manière plus simple et dans un espace mieux purgé de gaz, à l'aide d'un tube recourbé dont les deux bouts plongeaient dans des verres contenant du mercure (fig. 177), de manière à constituer un double baromètre de Cavendish. L'une des colonnes de mercure étant reliée avec le sol, on met l'autre en communication avec une machine électrique par un conducteur continu, ou mieux interrompu en un point de manière à provoquer des décharges successives. A chaque étincelle produite au point d'interruption, la chambre barométrique s'illumine d'une lueur plus ou moins vive. Toutefois cet accroissement de distance explosive n'est pas sans limite.

Fig. 177.

(1) *Phil. trans. abridged*, vol. X, p. 233.

489. Morgan, en 1785 (1), observa que le vide d'un baromètre bien construit se comporte comme un corps isolant et ne se laisse plus traverser par les étincelles. Il prépara un tube barométrique en faisant bouillir le mercure pour chasser les traces de gaz ou d'humidité, puis il couvrit la partie supérieure du tube d'une feuille d'étain de manière à ne cacher qu'une partie de la chambre à vide, et mit le mercure de la cuvette en communication avec le sol. En faisant toucher la feuille d'étain par le conducteur d'une machine électrique, il ne vit pas la moindre lueur, tandis que cet espace s'illuminait si on laissait rentrer une bulle d'air ou si l'on avait négligé de faire bouillir le mercure. Le phénomène est ici plus complexe parce que les lueurs sont alors dues à un phénomène d'influence, mais Walsh avait déjà reconnu que la chambre du double baromètre ne s'illumine plus quand l'appareil est bien construit.

Cependant les actions électriques et l'influence elle-même paraissent s'exercer encore dans le vide. Ainsi M. Harris a observé, en plaçant un électroscope à feuilles d'or dans une cloche purgée d'air autant que possible, que cet électroscope s'électrise encore par influence et que, si l'appareil a été chargé d'avance, les feuilles se maintiennent écartées; la disposition de M. Harris ne permettant pas d'obtenir une grande raréfaction, M. Ed. Becquerel a répété l'expérience avec le vide le plus parfait qu'on puisse obtenir par la pompe à mercure, et constaté que les feuilles d'or y restent divergentes. Faraday considérait aussi la matière pondérable comme nécessaire à la propagation de l'électricité, mais c'est à Masson que l'on doit d'avoir démontré cette propriété par une expérience directe.

490. Masson (2) fit construire des baromètres à mercure dans lesquels la partie vide portait à ses extrémités des fils de platine soudés au verre. Cette chambre, parfaitement purgée de gaz par une ébullition prolongée du mercure, était réunie au baromètre par un tube capillaire et on la détachait en fondant le tube en un point. Masson essaya de produire l'étincelle dans ces tubes au moyen d'une bobine de Ruhmkorff alimentée par 100 éléments Muncke, et il n'y put jamais parvenir. « En plaçant, dit-il, la

(1) *Phil. trans. abridg.*, vol. XV, p. 699.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXXI, p. 314.

langue dans le circuit, je n'ai pas éprouvé la moindre sensation, quoique le courant induit en agissant directement sur le corps, donnât des commotions insupportables et aussi fortes que celles produites par une bouteille de Leyde. Ainsi, les courants d'induction, les extra-courants, les courants des piles ne se propagent pas dans le vide barométrique... ; on doit en tirer la conséquence que *l'électricité ne produit pas de courant dans le vide absolu.* »

Néanmoins, les appareils de Masson n'auraient sans doute pas arrêté le passage de décharges notablement plus puissantes ; en effet, dans tous les tubes préparés à la manière des baromètres, il reste toujours au moins des vapeurs de mercure, de sorte que le vide ne peut être absolu. M. Gassiot (1) est parvenu à éviter ces dernières traces de vapeurs par un procédé ingénieux. Un tube muni de fils de platine à ses deux extrémités renferme une certaine quantité de potasse qu'on y a fondue de manière à l'étendre sur une grande surface. On fait passer dans ce tube un courant d'acide carbonique absolument pur, puis on raréfie le gaz avec une pompe pneumatique et on ferme l'appareil. Si l'on met alors les fils de platine en communication avec deux pôles d'une bobine d'induction, on observe une transformation continue des phénomènes lumineux, à mesure que le gaz restant est absorbé peu à peu par la potasse, jusqu'à ce qu'il le soit finalement d'une manière complète. Ainsi, dans l'une de ces expériences, les décharges qui ne pouvaient traverser dans l'air un intervalle de plus d'un pouce, passèrent comme une onde lumineuse dans toute l'étendue du tube qui avait 40 pouces de longueur ; puis, le gaz continuant de se raréfier, on vit naître des stratifications étroites au pôle positif, le pôle négatif étant entouré d'une lueur bleue ; plus tard les stratifications s'étendirent jusque dans le voisinage du pôle négatif qui devint d'un rouge vif ; ensuite l'illumination n'eut plus qu'une apparence nuageuse, et enfin toute lumière disparut. A ce moment, un galvanomètre placé sur le circuit n'indiquait plus la moindre déviation ; la décharge cessait donc de passer d'une manière absolue.

M. Gassiot remarqua que, lorsque la pression est assez faible

(1) *Phil. trans.* (1859), part I, p. 137.

pour que la décharge directe ne passe plus, un pareil tube est encore capable de s'illuminer par influence électrique. Pour obtenir les lueurs qui correspondent à des phénomènes d'influence, il suffit de mettre l'un des pôles de la bobine en communication avec l'un des fils de platine, et l'autre pôle avec une feuille d'étain appliquée sur la surface extérieure du tube, ou bien les deux pôles avec deux lames d'étain situées à une certaine distance l'une de l'autre, ce qui est à peu près l'expérience de Morgan. Ce physicien avait déjà reconnu aussi qu'il est extrêmement difficile de préparer un tube barométrique dans lequel les lueurs dues à l'influence cessent de se produire.

491. Depuis cette époque, M. Geissler et M. Hittorff [1] ont construit, à l'aide de la pompe pneumatique à mercure, des tubes dans lesquels le vide est assez parfait pour que deux fils dont la distance n'est pas supérieure à $\frac{1}{2}$ millimètre arrêtent complétement le passage de décharges électriques capables de franchir dans l'air un intervalle de 15 ou 20 centimètres.

L'appareil qui sert à répéter cette expérience se compose d'un tube de verre T (fig. 178) où l'on a fait le vide, et qui est traversé par deux fils de platine rapprochés à une petite distance. Ces fils communiquent à l'extérieur avec deux conducteurs montés sur une plaque d'ébonite, munis de branches mobiles p et p' que l'on peut éloigner à volonté et de deux bornes B et B'. Les deux bornes étant en communication avec les deux pôles d'une bobine d'induction, ou les deux pôles de la machine de Holtz, ou bien l'une d'elles communiquant avec le sol et l'autre avec une machine électrique quelconque, on voit que l'étincelle passe toujours à l'extérieur, entre les branches p et p', même quand on les écarte le plus. Il arrive parfois que la décharge se produit aussi dans le tube, mais elle n'a pas lieu entre les fils; il se forme sur la surface intérieure une flamme jaune dont la couleur, due à la soude du verre, indique que la transmission de l'électricité a lieu par la matière du tube lui-même.

Pour obtenir un appareil qui remplisse ces conditions, on peut, comme le faisait M. Gassiot, utiliser l'absorption de l'acide carbonique absolument pur par la potasse. M. Hittorf introduisait

[1] *Pogg. Ann.*, t. CXXXVI, p. 197. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XVII, p. 491.

dans le tube de l'air desséché par de l'acide phosphorique et y faisait le vide avec la pompe à mercure. Ces précautions ne suffisent pas encore pour enlever l'humidité ou les gaz qui adhèrent à la surface du verre et surtout les vapeurs de mercure; il est nécessaire de maintenir le tube à une température de 400 ou 500 degrés pendant qu'on fait le vide. M. Alvergniat, qui construit ces appareils avec une grande habileté, se sert de tubes en verre peu fusible et y fait le vide avec une pompe à mercure, pendant

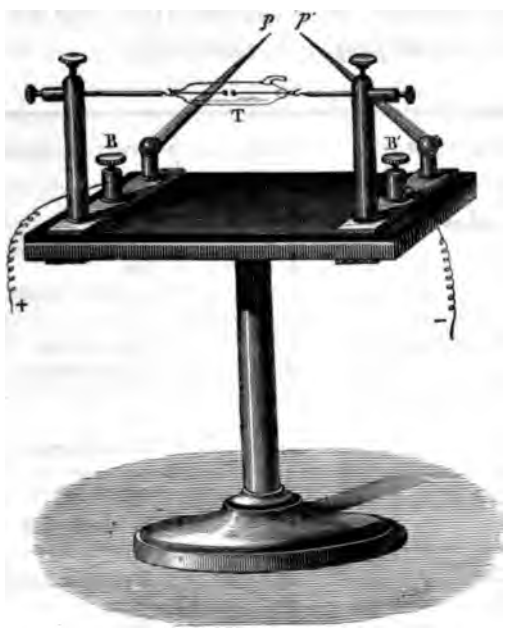


Fig. 178.

qu'ils sont chauffés jusque dans le voisinage de la température de ramolissement. Malgré toutes les précautions qu'on peut prendre, il est clair que le vide n'est jamais absolu, on ne fait qu'en approcher plus ou moins, et chaque appareil a une limite de résistance que l'on finit par vaincre avec des décharges suffisamment énergiques.

492. Pression du minimum de résistance. — Il résulte de ces différentes expériences, que le passage d'une étincelle au travers d'une couche d'air est d'abord plus facile à mesure que la pres-

sion diminue jusqu'à une certaine valeur, et qu'à partir de ce point, la résistance du milieu va en augmentant de plus en plus pour devenir sans doute infinie si l'espace considéré était absolument privé de gaz. Morren [1] a déterminé cette pression de résistance minimum pour un certain nombre de gaz. Le tube à gaz raréfié était placé, en même temps qu'un galvanomètre, sur le trajet d'un conducteur reliant les pôles d'une bobine d'induction. Les fils de métal soudés dans le tube étant assez éloignés, la décharge ne passait pas à la pression ordinaire, elle débutait à une certaine pression, et le courant, très-faible d'abord, allait ensuite en croissant jusqu'à un maximum.

NATURE DU GAZ	PRESSION	DÉVIATION DU GALVANOMÈTRE
	mm.	
Hydrogène. . . .	26	1°
	2,8	46 maximum.
	0,06	30
	0,01	A peine sensible.
Acide carbonique.	17	Appréciable.
	0,08	37 maximum.
Azote.	12	1°
	0,1	37 maximum.
Oxyde de carbone.	2,8	1°
	1,6	21 maximum.
Oxygène.	9	A peine sensible,
	6	46
	2,5	56
	0,6	62 maximum.

L'oxygène présenterait, d'après cela, une particularité assez singulière ; la résistance du gaz serait très-grande jusqu'à la pression de 9^{mm} pour augmenter brusquement d'abord, puis d'une manière plus lente. Comme toutes les expériences ont été faites avec le même tube, il en résulte aussi que la pression du maximum de conductibilité n'est pas la même pour tous les gaz.

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LIV, p. 735.

493. La manière curieuse dont varie la résistance d'un gaz peut être attribuée, au moins en partie, à cette circonstance que la décharge a la forme d'une étincelle très-mince quand la pression du gaz est assez grande, puis qu'elle s'élargit de plus en plus quand on raréfie le gaz, de sorte que le nombre des molécules par lesquelles s'effectue le passage de l'électricité peut aller d'abord en croissant malgré la diminution de pression. De la Rive annonce même avoir constaté que, dans le voisinage du maximum de conductibilité, la résistance d'un tube à gaz suit les mêmes lois que celle d'un conducteur métallique (1). Ce résultat ne paraît pas confirmé par les expériences ultérieures, car M. Schultz (2) a reconnu que la pression limite elle-même dépend des dimensions du tube. M. Schultz plaçait pour cela un micromètre à étincelles en dérivation sur le trajet de la décharge, et rapprochait les boules peu à peu jusqu'à ce que l'étincelle se produisît indifféremment dans le micromètre et dans le tube ; la distance des boules pouvait être considérée comme la mesure de la résistance du gaz. Voici, par exemple, quelques résultats obtenus avec de l'air bien desséché :

DIAMÈTRE DU TUBE	DISTANCE DES ÉLECTRODES	PRESSION LIMITE	RÉSISTANCE MINIMUM
		mm.	l.
15mm	50mm	0,9	0,05
16	90	0,37 à 0,085	0,1
0,5	90	2,5	0,25
16	2	6 à 0,29	< 0,05

On voit que la résistance minimum et la pression limite augmentent toutes deux à mesure que le diamètre du tube diminue, et que la résistance croît avec la distance des électrodes.

494. **Influence de la température.** — La conductibilité des vapeurs et des gaz chauds a été reconnue par des expériences très-anciennes. Ainsi, les flammes jouissent au plus haut degré du

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LVI, p. 669.
(2) *Pogg. Annalen*, t. CXXXV, p. 249. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XVI, p. 479.

pouvoir des pointes. Gilbert (1) avait déjà remarqué qu'un corps frotté perd ses facultés attractives dans le voisinage d'une flamme; de même, un corps qui communique avec une lampe conductrice allumée ne peut recevoir la moindre charge électrique, et un électroscope muni d'une lampe qui brûle s'électrise sous l'influence de corps très-éloignés : il suffit même de placer au-dessous d'un corps électrisé une barre de fer rougie au feu pour que l'air chaud qui s'élève ramène rapidement ce corps à l'état neutre (Canton).

Henley (2) plaçait un double pendule isolé au-dessus d'une machine électrique et à une distance assez grande pour qu'il ne pût s'électriser. En posant sur la machine une bougie récemment éteinte ou un vase renfermant de l'eau bouillante, il vit les boules du pendule diverger rapidement, par suite de l'électricité qui était entraînée avec les fumées ou la vapeur d'eau (3).

M. Grove montrait que l'échauffement d'un gaz à pression constante rend plus facile le passage des étincelles, en plaçant la flamme d'une lampe à alcool isolée entre les branches d'un excitateur reliées à une bobine d'induction ; la distance explosive est ainsi considérablement augmentée. La même expérience peut être répétée avec les décharges des batteries.

495. M. Fernet (4) a mis la même propriété en évidence d'une manière ingénieuse. Deux tiges de métal bien rectilignes sont disposées presque verticalement à une petite distance l'une de l'autre, de façon à former un angle très-aigu, dont le sommet est dirigé vers le bas. Ces deux tiges sont recourbées à angle droit au point où elles sont le plus voisines et mises en communication avec les pôles d'une bobine d'induction. Si la distance des tiges et l'angle qu'elles forment sont convenablement choisis, l'étincelle se produit d'abord au coude des deux tiges, aux points les plus rapprochés, puis s'élève peu à peu jusqu'à la partie supérieure, malgré l'accroissement de la distance. A ce moment, l'étincelle reparaît subitement à la partie inférieure et

(1) *De magnete*, p. 46 et 66.
(2) Cavallo, *Traité d'électricité*, p. 249.
(3) M. Thomson affirme cependant avoir constaté que la vapeur d'eau est un excellent isolant (*Reprint of papers*, p. 231, note).
(4) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LIX, p. 1005.

remonte encore, pour recommencer indéfiniment de la même manière. Il y a quelquefois plusieurs étincelles simultanées qui se suivent de bas en haut comme des échelons. Si, au contraire, les tiges sont disposées horizontalement, l'étincelle part toujours au coude, à la plus courte distance. L'explication de cette expérience est très-simple : l'air échauffé par le passage d'une première étincelle s'élève lentement, et l'étincelle suivante pourra trouver une moindre résistance dans cette couche plus chaude, si l'écartement des tiges n'augmente pas trop rapidement ; rien de pareil n'a lieu si les tiges sont horizontales. La même expérience peut être réalisée avec la machine de Holtz, si l'on a soin d'enlever les bouteilles de condensation, et il est bon même de ménager sur le circuit une interruption que l'on règle par tâtonnements, de façon que les étincelles se succèdent à des intervalles convenables. Enfin De la Rive (1) a reconnu que les vapeurs métalliques qui forment l'arc lumineux entre deux charbons, dans l'expérience de la lumière électrique, facilitent aussi le passage des étincelles.

496. Il semble résulter d'une expérience de M. Harris (2) que la diminution de résistance des gaz échauffés tient uniquement à ce que la masse absolue de l'unité de volume va alors en diminuant. M. Harris enferma de l'air à la pression atmosphérique et à la température ordinaire dans un globe de verre muni de deux garnitures par lesquelles passaient deux tiges de métal terminées en boule et placées en regard l'une de l'autre. Ces tiges communiquaient avec les armatures d'une jarre électrique, et il détermina par une bouteille de Lane la quantité d'électricité nécessaire pour provoquer des décharges entre les boules. Il porta ensuite le globe à la température de 148° et reconnut que la charge explosive n'avait pas changé. A ce moment, il suffisait de mettre brusquement le gaz intérieur à la pression atmosphérique en ouvrant un robinet, pour que la charge explosive diminuât brusquement, pour reprendre peu à peu sa valeur primitive à mesure que l'appareil se refroidissant revenait à la température extérieure.

Toutefois, cette unique expérience ne suffit pas pour démon-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. VIII, p. 437.
(2) *Phil. trans.* (1834), part. II, p. 229.

trer que c'est là une propriété générale. L'accroissement de conductibilité qu'acquièrent les corps solides ou liquides par une élévation de température permet de prévoir qu'il doit en être de même pour les gaz et les vapeurs, et que la diminution de masse n'en est pas la seule cause. M. Ed. Becquerel (1) a démontré, en effet, que les gaz deviennent assez conducteurs, à partir de la température du rouge naissant, pour être traversés par le courant de quelques éléments de pile, ce qui suppose un accroissement de conductibilité incomparablement plus grand que celui qui résulterait de la diminution de densité.

497. **Influence de la nature du gaz.** — Nous avons supposé jusqu'à présent que l'étincelle se produisait toujours dans l'air, ou du moins dans un même gaz; or, la nature des différents gaz intervient dans le phénomène. Faraday (2) déterminait ce qu'il appelait la *résistance spécifique* des différents gaz par la méthode des dérivations. Deux boules l' et L' (fig. 179) placées dans l'air communiquaient, l'une avec le conducteur N d'une machine électrique, et l'autre avec le sol; deux autres boules l et L, identiques aux premières et renfermés dans une cloche où l'on pouvait introduire un gaz quelconque, étaient reliées de la même manière avec la machine et avec le sol. La distance u des boules l et L étant constante, on déterminait par tâtonnements la distance maximum à laquelle pouvaient être éloignées les boules l' et L', pour que l'étincelle passât toujours dans l'air, et la distance minimum de ces deux boules, pour que l'étincelle se produisît constamment dans la cloche; la moyenne u' des distances ainsi obtenues représente l'épaisseur d'air équivalente à l'épaisseur u du gaz étudié.

En fait, les expériences laissent une assez grande incertitude sur les valeurs de la distance u', parce que les étincelles ont une tendance manifeste à continuer de se produire entre les mêmes boules, malgré les changements de distance. Les résultats sont plus concordants quand on a recours à une *étincelle auxiliaire*, en interrompant en un point le conducteur qui fait communiquer les boules l et l' avec la machine, et même en un autre point le conducteur qui réunit les boules L et L' avec le sol. Mal-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXXIX, p. 355.
(2) *Exp. Researches*, t. I, p. 440.

gré cette précaution, les mesures sont encore incertaines; les poussières qui se déposent sur le système des boules placées dans l'air, ou qui sont attirées par les actions électriques, favorisent beaucoup le passage des étincelles. On ne pourrait obtenir des nombres réguliers que si les deux paires de boules étaient enfermées séparément dans des cloches de verre, à l'abri des poussières étrangères, et leurs surfaces maintenues parfaitement lisses.

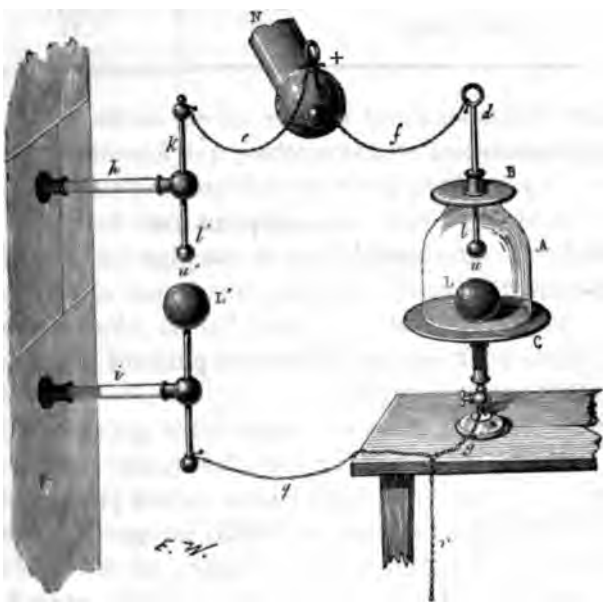


Fig. 179.

498. La résistance spécifique d'un gaz, ou son pouvoir isolant, peut être représentée par le rapport $\frac{u'}{u}$ de la distance explosive dans l'air à la distance explosive équivalente dans le gaz considéré à la même pression. Voici les résultats des expériences de Faraday; les petites boules l et l' avaient 22 millimètres de diamètre, les grosses boules L et L', 50 millimètres, et la distance u des boules l et L, qui restait constante dans toutes les expériences, était de 15 milimètres environ.

NATURE DU GAZ	POUVOIR ISOLANT	
	PETITES BOULES +	PETITES BOULES —
Air.	1	1
Hydrogène.	0,53	0,43
Oxygène.	0,72	0,80
Azote.	0,89	1
Acide carbonique. . .	0,92	0,93
Gaz oléfiant.	1,08	1,15
Gaz d'éclairage. . . .	0,71	0,83
Acide chlorhydrique. .	1,59	1,14

La première colonne est relative au cas où les petites boules l et l' communiquent avec la machine qui fournit de l'électricité positive ; les nombres de la seconde colonne correspondent au cas où les boules l et l' communiquent avec le sol, les autres communiquant directement avec la machine. Les pouvoirs isolants paraissent dépendre du sens dans lequel se produit la décharge, mais les résultats (sauf pour l'acide chlorhydrique) sont assez voisins pour que les différences puissent être attribuées aux erreurs expérimentales.

En effet, les expériences ne comportaient guère de précision. Ainsi, la cloche renfermant de l'air, les limites extrêmes de la distance u', lorsque les petites boules étaient positives, ont été 0,60 et 0,79 dont la moyenne est 0,695 ; lorsque les petites boules étaient négatives, les distances limites ont été 0,59 et 0,68 dont la moyenne est 0,635. Ces moyennes diffèrent toutes deux de la distance 0,62 des boules renfermées dans la cloche, ce qui ne devrait pas être. D'ailleurs, d'autres expériences conduisaient à des résultats sensiblement différents, de sorte qu'il ne faut voir dans ce tableau qu'une indication du sens des phénomènes. L'écart des valeurs extrêmes de la distance u' était surtout marqué quand les petites boules étaient positives.

Masson avait obtenu des nombres très-différents, 0,98 pour l'hydrogène, 1,13 pour l'acide carbonique, mais sa méthode qui était basée sur l'emploi du photomètre paraît encore moins correcte que celle de Faraday.

499. **Étincelles dans les liquides.** — Les liquides étant généra-

lement assez mauvais conducteurs de l'électricité, les décharges électriques peuvent les traverser sous forme d'étincelles comme cela a lieu dans les gaz. Beccaria (1) a pu même obtenir des étincelles dans l'eau, bien que ce liquide soit un bon conducteur. Masson a indiqué (112) un moyen très-simple de constater l'inégale résistance des liquides au passage de l'électricité ; c'est de placer dans un liquide un tourniquet électrique en communication avec une machine. Cet appareil ne tourne pas dans l'eau, par exemple, et tourne dans un liquide mauvais conducteur, comme l'essence de térébenthine ou l'huile d'olive.

Une autre expérience consiste à produire une étincelle entre deux boules, dont l'une est submergée dans l'eau et l'autre à l'extérieur, au-dessus de la première et à une petite distance de la surface. Dans ce cas l'étincelle passe directement entre les deux boules en ligne droite. Il suffit de verser à la surface de l'eau une mince couche d'huile pour que l'étincelle ne se produise plus de la même manière, elle s'étale alors sur la couche huileuse en se ramifiant et va chercher un autre chemin vers les parois du vase.

500. Masson (2) a comparé la résistance des liquides au passage de l'étincelle avec la résistance de l'air par la méthode des dérivations, comme l'avait fait Faraday pour les gaz. Par exemple, en plaçant deux boules dans l'eau à la distance de $0^{mm},25$ et deux boules identiques dans l'air à $3^{mm},15$, l'étincelle passait constamment dans l'air ; en écartant ces dernières boules de $3^{mm},50$, l'étincelle passait au contraire toujours dans l'eau. Le rapport des deux distances étant 12,6 pour le premier cas et 14 pour le second, on pouvait prendre la moyenne 13,3 comme indiquant le rapport du pouvoir isolant de l'eau à celui de l'air.

En opérant de même pour différents liquides, Masson a obtenu les résultats suivants :

Air	1	1
Éther	7	7,8
Esprit de vin de commerce	8	»
Eau	13	11,6
Alcool absolu	14	12
Essence de térébenthine	15	16

(1) Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. I, p. 381.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXX, p. 49.

Il est quelquefois difficile de provoquer les étincelles dans les liquides, à cause des fuites d'électricité qui ne permettent pas aux conducteurs d'atteindre une différence de potentiel suffisante, mais on y parvient plus aisément en ayant recours à une étincelle auxiliaire sur le trajet des boules à la machine. Avec les liquides autres que l'eau, l'alcool, l'éther et l'essence, Masson n'a pas pu obtenir de distances explosives supérieures à 3^{mm}; et alors la décharge prenait un très-grand éclat. Dans les liquides carburés, l'essence de térébenthine en particulier, il se produit des filaments noirs qui restent tendus entre les boules et nuisent à la régularité des expériences; ces filaments sont des parcelles de charbon qui proviennent de la décomposition du liquide par l'étincelle.

501. **Réfraction de l'étincelle.** — On peut montrer par une expérience, dont la forme est au moins curieuse, que la résistance des liquides est très-grande par rapport à celle des gaz. Dans un vase en verre on verse un mélange d'huile d'olive et d'essence de térébenthine en parties à peu près égales. Deux boules de métal portées par des tiges verticales recourbées horizontalement, comme celle qui est représentée en L (fig. 174), sont placées, l'une dans le liquide à une profondeur de quelques millimètres, l'autre dans l'air à une petite distance du liquide, mais à 10 centimètres environ de la première, et l'on fait éclater une étincelle entre ces deux boules. L'étincelle part de la boule submergée presque normalement à la surface du liquide, et marche ensuite directement vers l'autre boule. La nature du phénomène ne permet pas de déterminer ces directions exactement, puisque des étincelles aussi longues sont un peu en zigzag et qu'elles ne se produisent pas toujours au même point, mais il y a là quelque chose d'analogue à la réfraction de la lumière. L'étincelle prend évidemment le chemin qui offre la moindre résistance et fait un trajet très-court dans le liquide.

Si les deux boules sont submergées et à plusieurs centimètres de la surface, l'étincelle part entre elles en ligne droite; si, laissant entre les boules le même écart, on les rapproche de la surface, il arrive un moment où l'étincelle se dirige presque normalement de chacune des boules vers la surface du liquide, et quitte le liquide pour cheminer dans l'air vers l'autre boule. Le

phénomène présente alors une grossière analogie avec celui de la réflexion totale de la lumière.

L'expérience réussit de la même manière avec la benzine ou l'essence de térébenthine, mais alors le liquide s'enflamme facilement, ce qui peut offrir quelques dangers, parce qu'on opère sur une quantité assez grande; l'addition d'huile d'olive a pour but de rendre le liquide moins inflammable, tandis que l'huile d'olive pure offrirait une trop grande résistance à l'étincelle.

502. Ces expériences m'ont permis de constater encore un phénomène tout à fait inattendu. Quand on décharge une batterie entre deux boules plongées dans un liquide mauvais conducteur, comme l'essence de térébenthine, et que la distance explosive est très-grande, il arrive souvent que l'étincelle ne se produit pas au moment où l'on ferme le circuit extérieur. Cependant le liquide est légèrement agité, et au bout d'un temps appréciable, qui atteint quelquefois 10 ou 15 secondes, la décharge se fait violemment. Ce *retard* à la production de l'étincelle ne s'est manifesté qu'avec des charges électriques assez grandes, et quand la distance explosive était voisine de la limite maximum (de 5 à 15 millimètres, ce qui équivaut, d'après les nombres de Masson, à une distance de 8 à 20 centimètres dans l'air). A ce moment, la décharge est si violente, qu'une colonne liquide se soulève au-dessus de la surface, et que le vase en verre, en porcelaine ou en terre cuite est fréquemment brisé: il faut avoir soin de le placer dans un vase plus grand afin de recueillir le liquide et les débris, et prendre des précautions pour éviter les dangers qui résulteraient de l'inflammation de l'essence.

503. **Influence de la nature de l'électricité et de la forme des conducteurs.** — On a vu déjà, dans les expériences de Faraday sur les résistances spécifiques des gaz, que la nature de l'électricité paraît avoir une certaine influence; Faraday a mis cette propriété en évidence d'une manière très-ingénieuse.

L'une des branches de l'excitateur porte une fourche métallique, comme celle qui est représentée en F (fig. 174), terminée par deux boules dont l'une A est d'un diamètre notablement plus grand que la seconde a; l'autre branche porte de même deux boules B et b, séparément identiques aux deux premières. Les deux fourches sont disposées verticalement en face l'une de

l'autre, une grosse boule en regard de la petite opposée, et les deux distances étant égales. Si l'on provoque des étincelles entre ces deux fourches, on constate que les décharges passent entre les boules A*b* si la fourche B*b* est positive et entre les boules *a*B si c'est la fourche A*a* qui est positive. Par conséquent, la distance explosive entre deux boules inégales est plus grande lorsque la plus petite des deux est chargée d'électricité positive que dans le cas contraire.

La différence est peut-être plus marquée encore quand on remplace la petite boule par une pointe ; seulement il faut alors une étincelle auxiliaire, si l'on se sert d'une machine électrique ordinaire, ou bien employer une bobine d'induction.

504. Voici encore quelques expériences de Faraday :

Deux boules A et *a*, la première de 2 pouces et la seconde de 0^{p},25 de diamètre, sont placées en regard ; l'une d'elles est en communication directe avec la machine et l'autre avec le sol : cette dernière ne se charge donc d'électricité que par influence. Si la boule A était influente et *positive*, les étincelles se produisaient avec une machine donnée jusqu'à la distance de 0^{p},49 ; à 0^{p},51, on avait un mélange d'aigrettes et d'étincelles, et à 0^{p},52 il n'y avait plus que des aigrettes.

La boule A étant influente et *négative*, il y eut des étincelles jusqu'à la distance de 1^{p},15, un mélange d'étincelles et d'aigrettes à 1^{p},55 et des aigrettes seulement à la distance de 1^{p},65.

Lorsque la petite boule *a* était chargée par influence d'électricité positive, la distance explosive était donc trois fois plus grande que dans le cas contraire.

Si maintenant la boule *a* était influente, c'est-à-dire en communication avec la machine, et *positive*, les étincelles se produisaient à la distance de 0^{p},67, le mélange d'aigrettes et d'étincelles depuis 0^{p},68 jusqu'à 0^{p},72, et l'aigrette positive seulement à la distance de 0^{p},74 et au-dessus.

Enfin, la boule *a* étant influente et *négative*, les étincelles n'eurent lieu qu'à la distance de 0^{p},40, le mélange d'aigrettes et d'étincelles à 0^{p},42 et les aigrettes négatives seules à 0^{p},44 et au-dessus.

Dans le cas actuel, la distance explosive était encore presque doublée lorsque la petite boule était positive plutôt que négative.

505. Lorsque deux conducteurs sont ainsi placés en regard l'un de l'autre et maintenus à des potentiels différents, les quantités d'électricités contraires accumulées sur deux éléments de surface correspondants (162), c'est-à-dire compris entre les mêmes orthogonales ou les mêmes lignes de force, sont égales, et l'on voit aisément que la densité électrique est plus grande sur celui des conducteurs qui a la plus grande courbure. La pression électrique, qui est proportionnelle au carré de la densité, est à plus forte raison maximum de ce côté. Il semble donc que c'est là que la résistance de l'air doit être vaincue tout d'abord, et, par suite, dans les expériences qui précèdent, le début de l'étincelle doit avoir lieu sur la plus petite boule. Comme l'explosion est toujours plus facile quand cette boule est positive, il en résulterait que, toutes choses égales d'ailleurs, l'électricité positive aurait plus de tendance à s'échapper à travers l'air que l'électricité négative.

Néanmoins Faraday a cru remarquer qu'un conducteur électrisé et isolé dans l'air se décharge plus facilement lorsque l'électricité est négative. Pour concilier ces résultats qui semblent contradictoires, on pourrait remarquer qu'un conducteur en relation avec une machine ne peut arriver à posséder le potentiel nécessaire pour que l'étincelle franchisse une distance déterminée, que si la déperdition par l'air est, jusqu'à ce moment, inférieure à la quantité d'électricité que fournit la machine. Les expériences de Faraday s'expliqueraient alors en admettant que, dans les cas où la plus petite boule est négative, la déperdition par l'air est beaucoup exagérée ; le conducteur ne peut pas alors atteindre le même potentiel, ni provoquer la même étincelle que s'il était chargé d'électricité positive. Il faudrait, pour résoudre cette question, déterminer chaque fois le potentiel atteint par les différents conducteurs.

506. **Soupapes électriques.** — Quoi qu'il en soit, les deux électricités ne se comportent certainement pas de la même manière, et cette différence de propriétés a conduit M. Gaugain à la construction d'un appareil très-ingénieux auquel il a donné le nom de *soupape électrique* (1).

(1) *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*, t. XL, p. 640 (1855).

On se sert pour cela d'un *œuf électrique*, c'est-à-dire d'un vase de verre allongé (fig. 180), à deux tubulures fermées par des garnitures métalliques. La garniture inférieure est munie d'un robinet qui permet de raréfier le gaz et porte une tige terminée en boule. La garniture supérieure est traversée par une tige qui glisse dans une boîte à cuir et se termine en bas par une boule. On couvre l'une des boules et la tige correspondante d'une couche de vernis à la gomme laque, en dénudant seulement un point de la surface; l'autre boule reste nue. Si l'on met la boule vernie en communication avec le pôle positif d'une bobine d'induction de moyenne force et la boule nue avec le pôle négatif, en plaçant un galvanomètre dans le circuit, on constate que la déviation de l'aiguille va constamment en croissant à mesure que diminue la pression du gaz renfermé dans l'œuf. Si, au contraire, la boule vernie communique avec le pôle négatif, la déviation de l'aiguille, d'abord croissante à mesure que la pression diminue, atteint ensuite un maximum, puis décroît, passe par zéro et finit par se produire dans un sens opposé, indiquant un courant qui va de la boule vernie à la boule nue, comme dans le cas précédent.

Fig. 180.

Or, la bobine fournit alternativement des courants de sens contraires; l'un d'eux, le courant direct, qui a une tension plus grande, est le seul qui passe habituellement quand on ménage une interruption dans le circuit; c'est celui qui donne leurs signes aux deux pôles de la bobine. La déviation de l'aiguille augmentant d'abord dans les deux cas, cela indique que la résistance du gaz va en diminuant et que le courant direct reste prédominant; mais, dans le second cas, quand la pression est suffisamment faible, le courant direct est supprimé et la conducti-

bilité du gaz devient assez grande pour que le courant inverse puisse passer. Il en résulte que, pour une pression convenable, l'œuf laissera toujours passer des courants de même sens, de la boule vernie à la boule nue, quelle que soit la manière dont on aura établi les communications avec la bobine. Cet appareil agit donc comme une véritable soupape, ne livrant passage qu'aux courants qui marchent dans une certaine direction; on voit de suite le parti que l'on peut en tirer, soit pour démêler des décharges superposées ou successives de sens contraires, soit pour déterminer le sens d'une décharge dans des cas où l'emploi d'un autre procédé plus direct serait impraticable.

Ajoutons, toutefois, que cette propriété n'est pas absolue et qu'une tension électrique suffisante finit toujours par vaincre la résistance d'une soupape et traverser l'appareil dans un sens quelconque.

507. Comme l'addition d'une simple couche de vernis établit entre les deux boules une différence suffisante pour constituer une soupape électrique, on conçoit qu'il doit y avoir bien d'autres manières d'arriver au même résultat.

M. Poggendorff [1] a constaté que tous les tubes à gaz raréfiés, dits *tubes de Geissler*, dans lesquels les deux électrodes n'ont pas la même forme, jouissent plus ou moins des mêmes propriétés. On obtient des soupapes très-efficaces en effilant l'une des électrodes et terminant l'autre par un petit disque perpendiculaire à la longueur du tube.

M. Holtz a imaginé de produire ces différences de résistances, non pas sur les conducteurs, mais dans l'intérieur même du gaz. Il emploie pour cela un tube cylindrique (fig. 181, n° 1), divisé en un certain nombre de compartiments par des cloisons en forme d'entonnoirs dont tous les becs sont dirigés du même côté. Ces tubes ne fonctionnent pas aussi régulièrement que les soupapes de M. Gaugain, mais ils sont plus faciles à construire, ils montrent ce phénomène par un effet lumineux plus brillant et on en peut tirer à peu près les mêmes avantages. Ainsi, quand on place sur le trajet d'une décharge deux tubes pareils disposés en dérivation parallèlement entre eux, de façon que les entonnoirs soient diri-

[1] *Monatsbericht*, déc. 1857, p. 801. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XIV, p. 482.

gés en sens contraires, ou un seul tube à deux branches parallèles, on constate que la décharge passe, sinon totalement du moins en grande partie, par celui des deux tubes où le courant d'électricité positive traverse les entonnoirs en entrant par la pointe. Toutefois, il faut que les décharges soient assez faibles pour qu'il se manifeste une différence bien marquée. M. Poggendorff a reconnu que le courant continu de la machine de Holtz, c'est-à-dire sans interruption dans le circuit extérieur, passe entièrement dans l'un des tubes; si l'on provoque des décharges discontinues par une étincelle auxiliaire de plus en

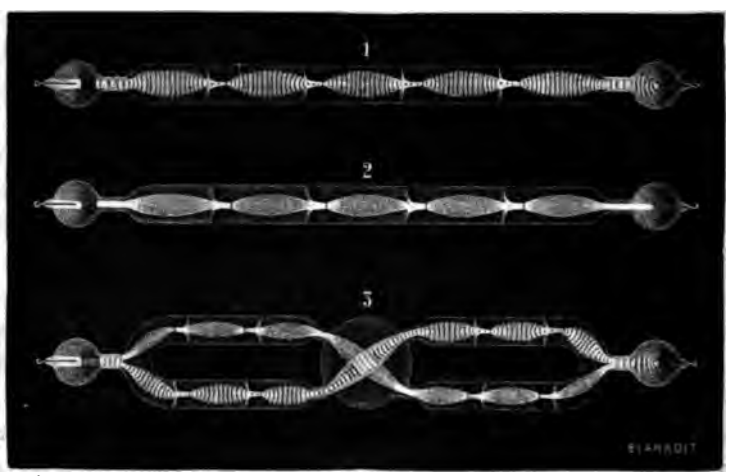


Fig. 181.

plus longue, sans que la machine soit munie de ses bouteilles, le flux électrique se partage inégalement d'abord, puis à peu près indifféremment entre les deux tubes; avec les décharges des bouteilles de condensation on n'aperçoit bientôt plus de différences, et les deux branches s'illuminent à peu près de la même manière.

M. Daniel (1) a employé ainsi un tube à deux branches parallèles (fig. 181, n° 3), réunies au milieu par une boule, dans lequel les entonnoirs du tube supérieur gauche et du tube infé-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXX, p. 808.

rieur droit sont dirigés dans le même sens, et les autres en sens contraire. Une seule décharge dans cet appareil s'infléchit au milieu pour passer d'un des tubes dans l'autre; si l'on emploie simultanément deux séries de décharges de sens contraires, comme celles d'une machine de Holtz et d'une bobine d'induction, on constate par les différences d'aspect de l'illumination que ces décharges se croisent au milieu de la boule centrale commune aux deux chemins.

Ces tubes à entonnoirs ne donnent pas toujours de bons résultats; il faut qu'il y ait un rapport convenable entre les diamètres du pavillon et du tube des entonnoirs, que la pression du gaz qui reste soit assez faible et que la décharge ne soit pas trop puissante.

508. Des phénomènes analogues, relatifs à la différence d'action des deux électricités avaient déjà été constatés dans des expériences anciennes. Ainsi, en 1819, Erman [1] avait constaté que la lampe sans flamme de Davy laisse échapper plus facilement l'électricité positive. Il a mis en communication avec un électroscope à feuille d'or une lampe métallique à alcool au-dessus de laquelle était suspendue une spirale de platine, maintenue à l'incandescence par les gaz chauds qui se dégagent de la mèche récemment éteinte. Quand il présentait au-dessus de la lampe, à une distance de 4 ou 6 pouces, le pôle négatif d'une pile sèche ou l'armature négative d'une bouteille de Leyde faiblement chargée, les feuilles de l'électroscope divergeaient aussitôt. Quand il présentait ensuite, de la même manière, le pôle positif ou l'armature positive, la divergence des pailles était nulle ou incomparablement plus faible. De même, la lampe étant isolée et électrisée, il en approchait à la même distance un plateau conducteur relié à un électroscope : cet électroscope indiquait rapidement une grande divergence si la lampe était positive, et s'électrisait à peine quand la lampe était négative. M. Riess remarqua, en 1844, qu'une baguette de charbon incandescente jouait le même rôle, mais en facilitant au contraire le dégagement d'électricité négative. Enfin, M. Andrews avait déjà constaté en 1836 que les courants d'une machine magnéto-électrique ne traversaient la

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXV, p. 278.

flamme d'un feu de charbon que si ces courants allaient en descendant de la flamme au charbon.

M. Riess (1) a obtenu encore un effet analogue à l'aide de la flamme d'un simple bec de Bunsen, au-dessus de laquelle il plaçait un fil de platine. Le courant d'induction produit par la décharge d'une batterie avait une intensité trois fois plus grande quand il descendait du platine au tube à gaz que lorsqu'il allait en sens contraire. Ce sont là autant d'exemples de soupapes plus ou moins efficaces.

DIFFÉRENTES FORMES DES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES.

509. Les décharges électriques se présentent sous des formes très-différentes sur lesquelles nous n'avons pas insisté jusqu'à présent, quoique nous les ayions déjà rencontrées dans plusieurs expériences; il est utile d'y établir une certaine classification, bien qu'elles puissent se transformer les unes dans les autres par des transitions insensibles, et qu'elles ne présentent pas de différences absolues. Faraday en distingue quatre espèces : 1° l'*étincelle* proprement dite; 2° l'*aigrette*; 3° la *lueur*; 4° la *décharge obscure*.

510. **Étincelle.** — Le trait de feu par lequel un conducteur électrisé se décharge quand on en approche un autre conducteur en communication avec le sol est une étincelle proprement dite; mais cette étincelle peut avoir des formes très-variées.

Si la distance explosive est faible, l'étincelle est en général un trait rectiligne très-lumineux, d'épaisseur et d'éclat uniformes dans toute sa longueur. La largeur de l'étincelle augmente de plus en plus avec une quantité d'électricité, et la décharge d'une batterie de très-grande surface a plutôt l'apparence d'une boule de feu ou d'une flamme. A mesure que la distance explosive augmente, l'étincelle s'amincit, surtout dans sa partie médiane, tout en conservant beaucoup d'éclat vers ses extrémités. Les figures 152 et 153 représentent des étincelles obtenues entre le conducteur

(1) Pogg. Annal., t. LXXXVI, p. 71. — Annales de Chimie et de Physique, 3e série, t. VIII, p. 481.

d'une machine électrique et la tranche d'un large plateau métallique en communication avec le sol. Avec la machine électrique

Fig. 182. Fig. 183.

de l'Ecole de Médecine qui fournissait une grande quantité d'électricité, M. Gavarret (1) obtenait ainsi des étincelles rectilignes jusqu'à une distance de 8 centimètres environ ; à deux centimètres de distance, les étincelles se succédaient avec une telle rapidité, qu'elles faisaient un bruit continu analogue à celui d'une pièce de soie qu'on déchire ; à la distance de 8 centimètres, les étincelles étaient très-distinctes les unes des autres.

A partir d'une certaine distance explosive, distance qui aug-

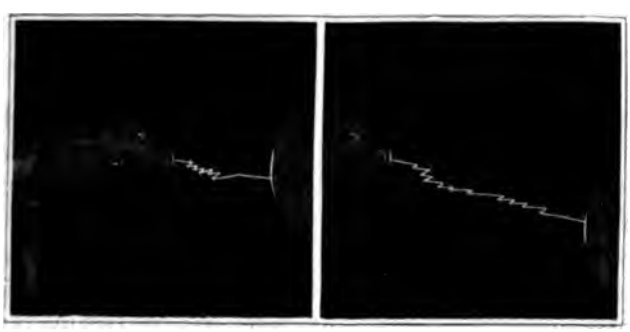


Fig. 184. Fig. 185.

mente avec les dimensions ou la capacité du conducteur électrisé, c'est-à-dire avec la quantité d'électricité qui s'écoule par

(1) *Traité d'électricité*, t. II, p. 460 et suivantes.

chacune des décharges, l'étincelle n'est plus rectiligne, mais formée d'une succession de lignes droites disposées en zigzags. Les figures 184 et 185 représentent les étincelles obtenues entre le conducteur d'une machine et un plateau métallique, aux distances de 15 et de 25 centimètres.

Dans l'air atmosphérique et à la pression ordinaire, les étincelles sont d'un blanc bleuâtre teinté de pourpre aux extrémités ; elles se produisent à peu près de la même manière dans les autres gaz, mais prennent des teintes différentes, sur lesquelles nous reviendrons.

Si l'on continue d'augmenter la distance explosive, l'étincelle présente une forme plus complexe ; elle laisse échapper latéralement des traits lumineux qui partent surtout des angles des

Fig. 186.

zigzags et se ramifient à leur tour ; ces ramifications sont brillantes et d'une couleur blanchâtre à leur base comme l'étincelle elle-même, mais elles deviennent ensuite d'un bleu violacé et leur éclat s'affaiblit peu à peu vers leurs extrémités (fig. 186).

511. **Aigrette.** — Les ramifications violacées marquent la transition de l'étincelle en zigzags à l'aigrette. Lorsqu'une machine est en activité dans une chambre obscure, des jets lumineux ou aigrettes s'échappent des parties les plus saillantes des conducteurs avec un bruit sourd analogue à celui d'un soufflet ou d'un jet de vapeur. Ces aigrettes sont formées généralement d'un pédicule rectiligne assez brillant qui, à partir d'un certain point, se ramifie brusquement en un grand nombre de branches divergentes d'une

teinte violacée beaucoup moins vive; les branches se ramifient à leur tour et finissent par s'éteindre tout à fait.

Fig. 187.

Le nom d'aigrettes et la première observation de cette forme de décharge sont dus à Gray (1). Ayant électrisé dans l'obscurité des corps métalliques soutenus par des fils de soie, il vit la matière électrique s'en échapper sous cette forme avec un bruissement qu'on entendait d'une manière distincte en prêtant attentivement l'oreille. Ces phénomènes acquirent bientôt plus d'éclat quand on employa des machines électriques plus puissantes; les ouvrages de l'abbé Nollet renferment un grand nombre de

Fig. 188.

figures qui représentent de longues aigrettes s'échappant des conducteurs électrisés, surtout vers les parties anguleuses.

(1) *Phil. trans. abridg.*, vol. VIII, p. 5 (1735).

On produit de très-belles aigrettes en approchant du conducteur de la machine la tranche d'un plateau métallique, à une distance un peu supérieure à la distance explosive, et surtout en terminant ce conducteur par une boule de dimensions plus petites. La figure 187 représente une aigrette obtenue à la distance de 35 centimètres. Dans ces conditions, le bord du disque, devenu légèrement lumineux, est séparé de l'aigrette par un espace

Fig. 189.

qui paraît complétement obscur. Si l'on exagère un peu le débit de la machine, les branches de l'aigrette s'inclinent davantage vers le plateau, auquel elles se réunissent (fig. 188) par un faisceau de rayons blanchâtres parallèles. A ce moment, une étincelle véritable est sur le point d'éclater. Les aigrettes se dessinent encore mieux quand le conducteur extérieur non isolé

présente une grande surface, comme une sphère ou la face d'un large plateau (fig. 189).

512. Nous avons supposé implicitement dans ces expériences que la machine fournit de l'électricité positive ; mais, en réalité, le phénomène est toujours produit par le concours des deux électricités, puisque le conducteur non isolé s'électrise par influence. En effet, si l'on approche du conducteur de la machine de Nairne qui se charge d'électricité négative, une tige terminée par une petite boule (fig. 190), on obtient sur cette boule une aigrette positive ramifiée et, sur le conducteur, une aigrette négative plus courte, formée de traits parallèles très-rapprochés ; ces deux aigrettes sont séparées par un intervalle obscur.

Fig. 190.

La différence d'aspect des deux électricités, au moins dans l'air atmosphérique, se manifeste dans une foule de circonstances. Cavallo (1), se servant d'une machine électrique à cylindre de verre en face duquel se trouvait un conducteur terminé par un peigne métallique, remarqua que chacune des pointes du peigne était terminée par un point lumineux et que le coussin laissait quelquefois échapper de longs jets de feu dirigés vers le peigne et couvrant à peu près la moitié du cylindre de verre. Une manière plus simple d'observer ce phénomène est d'employer un

(1) *Traité d'électricité*, p. 165 et 192.

excitateur à manches de verre dont les extrémités sont terminées en pointe. Quand on approche ces pointes à une petite distance des deux armatures d'une bouteille de Leyde électrisée, on voit une aigrette à la pointe positive, une étoile à la pointe négative, et l'éclat des deux pointes diminue peu à peu jusqu'à ce que la bouteille soit entièrement déchargée. De même, dans la machine de Holtz, les dents du peigne négatif sont terminées par des étoiles brillantes, tandis que le peigne positif laisse échapper une nappe de feu violacée, qui est une véritable aigrette. D'ailleurs, les aigrettes peuvent prendre une infinité d'apparences différentes, suivant la forme, la distance et la disposition des corps entre lesquels elles se produisent.

Dans les gaz autres que l'air ou l'azote, les aigrettes présentent des aspects et des colorations variables, mais l'aigrette positive est en général moins développée, et il est quelquefois difficile de distinguer par ce moyen une différence entre les deux espèces d'électricité.

513. L'étincelle et l'aigrette ont un caractère commun, la discontinuité. Ce caractère n'est pas douteux pour l'étincelle, puisque l'on voit presque toujours distinctement les décharges successives; pour l'aigrette, il suffirait à la rigueur de constater qu'elle est toujours accompagnée d'un bruit qui a une certaine tonalité. A mesure qu'on diminue les dimensions des conducteurs, le jet lumineux perd de son étendue en même temps que le son devient plus aigu et plus faible; les décharges sont alors plus fréquentes et moins intenses. D'ailleurs, on peut distinguer les décharges successives en observant l'aigrette dans un miroir tournant comme l'a fait M. Wheatstone. Si l'aigrette est un peu longue, on peut encore apercevoir la discontinuité par un moyen plus simple; il suffit, en maintenant la tête immobile, d'imprimer à l'œil des mouvements rapides à droite et à gauche, pour voir la gerbe lumineuse se diviser en un certain nombre d'aigrettes élémentaires distinctes les unes des autres.

514. La succession rapide des aigrettes prouve que chacune d'elles ne laisse échapper qu'une fraction très-faible de l'électricité du conducteur, tandis que l'étincelle produit une décharge presque complète. M. Gaugain a insisté beaucoup sur cette différence qui permet d'établir entre les deux phénomènes une

distinction plus nette. Les deux formes de décharges se produisent d'ailleurs pour la même différence de potentiel, au moins très-sensiblement. Les expériences de Faraday (504) montrent déjà que la distance maximum à laquelle une machine peut se décharger est à peu près la même lorsque cette décharge a lieu sous forme d'aigrettes ou d'étincelles; M. Gaugain (1) a vérifié cette propriété d'une autre manière. Si le conducteur d'une machine porte un électroscope, par exemple un pendule électrique, on constate que la déviation du pendule augmente peu à peu jusqu'à ce qu'une aigrette commence à se produire entre un point de la machine et un corps voisin non isolé, et qu'à partir de ce moment elle se maintient constante. Les aigrettes cessent aussitôt que la déviation du pendule diminue pour une cause quelconque, comme le ralentissement de la machine. Si maintenant, sans changer la distance explosive, on provoque la décharge sous forme d'étincelles, en augmentant le débit de la machine, on voit le pendule diverger peu à peu jusqu'à la distance à laquelle il s'était maintenu pour l'aigrette, puis tomber brusquement au moment de l'étincelle, et se relever ensuite.

Une foule de circonstances peuvent transformer l'aigrette en étincelle; il suffit, par exemple, d'accélérer la rotation de la machine, d'augmenter la capacité du conducteur, ou d'employer une étincelle auxiliaire.

515. La machine de Holtz convient parfaitement pour montrer ces différentes formes de décharges et leurs transformations. Si l'on enlève les bouteilles de la machine et qu'on écarte les deux branches de l'excitateur à une assez grande distance, on obtient de belles aigrettes de formes très-variées. A mesure qu'on rapproche les deux boules, le son des aigrettes s'élève de plus en plus; quand la distance n'est plus que d'un ou deux centimètres, la décharge s'effectue sous la forme d'un faisceau de traits parallèles violacés pour la plupart, mais mélangés de traits plus éclatants qui paraissent blancs; on a alors un mélange continu d'aigrettes et d'étincelles. Pour obtenir des étincelles à une distance un peu grande, il faut augmenter la capacité des conducteurs de la machine, en y adaptant les bouteilles de condensation.

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. VIII, p. 89.

516. Décharges des bobines d'induction. — Le mélange d'aigrettes et d'étincelles est presque toujours la forme que prennent les décharges de la bobine d'induction dans l'air, à la pression atmosphérique. Si les interruptions du courant inducteur sont rapides, ce qui a lieu avec les bobines de dimensions moyennes, les décharges paraissent se produire d'une manière continue, et sont composées d'une flamme violacée et d'étincelles ayant l'apparence de traits de feu. La flamme a une durée sensible, car elle s'élargit quand on l'examine dans un miroir tournant (M. Lissajoux), tandis que le trait de feu est instantané, et ces deux parties de la décharge peuvent être modifiées séparément par des influences extérieures. Ainsi, quand on projette avec un soufflet ou avec la bouche un courant d'air sur la décharge, la flamme est déviée par le courant, et l'étincelle continue de se propager en ligne droite avec quelques jets de feu latéraux (M. Du Moncel). Il suffit même de placer un corps étranger quelconque, conducteur ou non, dans le voïsinage des deux points entre lesquels éclate la décharge, pour en séparer les deux éléments : l'aigrette n'est pas modifiée, le trait de feu se dévie et va d'une pointe à l'autre en touchant le corps voisin (M. Perrot). On peut d'ailleurs de plusieurs manières séparer la flamme de l'étincelle; M. Perrot (1) a obtenu ainsi la production de ces deux formes de la décharge sur deux dérivations différentes du circuit total, ce qui promet d'en étudier séparément les propriétés.

517. Lueur et décharge obscure. — Il arrive quelquefois qu'une machine électrique en activité présente aux extrémités des conducteurs, surtout quand elles sont terminées par des boules de petit diamètre, une lueur d'un éclat et d'une étendue variables, tranquille, continue, et qui n'est accompagnée d'aucun bruit. Faraday, qui a étudié avec beaucoup de soin cette décharge particulière, a constaté que, pour transformer l'aigrette en lueur dans l'air ordinaire, il faut diminuer les dimensions du conducteur aux points ou se fait la décharge, forcer le débit de la machine et éloigner tous les corps étrangers. Ainsi, le conducteur d'une machiue étant muni d'une tige arrondie de petit diamètre de manière à obtenir une lueur, il se forme des aigrettes quand

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LXI, p. 214.

on ralentit ou qu'on arrête la machine. L'appareil fonctionnant de manière à produire des aigrettes, l'approche d'une pointe aiguë suffit pour transformer les aigrettes en lueurs. Enfin, si la machine tourne assez rapidement pour donner une lueur et qu'on en approche la main, la lueur se contracte d'abord, puis se transforme en aigrettes avec de grandes ramifications. On peut encore, en présentant au conducteur de la machine une petite boule munie d'une pointe, en tirer des étincelles des aigrettes ou des

Fig. 191.

Fig. 192

lueurs, suivant que la direction de la pointe se rapproche plus ou moins de la normale au conducteur.

Il est impossible d'apercevoir dans ces lueurs des décharges intermittentes; elles paraissent donc être le siége d'une communication continue d'électricité à l'air ambiant, ce que semble indiquer encore l'existence d'un courant d'air assez rapide au point où elles se manifestent. La lueur négative est beaucoup plus difficile à obtenir dans l'air que la lueur positive; mais c'est particulièrement dans les gaz raréfiés qu'on observe ces appa-

rences, et le passage de l'aigrette à la lueur se fait alors par une série de transitions insensibles.

518. **Illumination des gaz raréfiés.** — Supposons, par exemple, qu'on fasse l'expérience avec un œuf électrique. L'appareil étant rempli d'air à la pression ordinaire, on met la garniture inférieure en communication avec le sol, et la garniture supérieure à une petite distance du conducteur de la machine. Si la distance des deux boules de l'œuf n'est pas trop grande, il se produit à chaque étincelle extérieure, une étincelle ordinaire en zigzag entre les deux boules (fig. 191).

A partir de ce moment, si l'on raréfie graduellement l'air contenu dans l'œuf électrique, le phénomène se modifie : l'étincelle fournit d'abord des ramifications latérales, puis se transforme en une véritable aigrette.

Fig. 193.

A la pression de 5 ou 6 centimètres, il s'échappe de la boule supérieure qui est positive, une multitude de bandes de couleur pourpre, dont les unes sont dirigées vers les parois de l'œuf, tandis que d'autres constituent un faisceau de rubans lumineux ayant la forme d'un fuseau, et aboutissant à la boule négative. En même temps, cette dernière boule et la tige qui la supporte sont enveloppées d'une couche épaisse de lumière violacée (fig. 192).

Enfin, à la pression de quelques millimètres, l'intervalle des deux boules est rempli par une colonne fusiforme de lumière pourprée, dont l'éclat va en augmentant graduellement vers les extrémités, surtout du côté de la boule positive, et la boule négative est toujours enveloppée d'une auréole de couleur violette (fig. 193).

Il est difficile de saisir le moment à partir duquel l'aigrette a perdu son caractère, mais à une pression faible il est clair que le phénomène est transformé : ce sont de véritables lueurs.

519. Si la garniture supérieure de l'œuf est mise en communication directe avec le conducteur de la machine ou terminée par une pointe qui donne un flux continu, la décharge ne se produit plus à une aussi grande distance; la boule positive donne une gerbe de lumière pourpre, la boule négative est enveloppée d'une auréole violacée, mais la gerbe et l'auréole sont séparées par un intervalle complétement obscur, au moins par comparaison avec les portions voisines (fig. 194). Cet espace plus sombre qui s'observe dans tous les gaz est nécessairement le siége d'un mouvement des fluides électriques, et c'est là ce que Faraday appelle la *décharge obscure*. Toutefois, il est difficile d'affirmer qu'il ne s'y produise aucune apparence lumineuse; l'obscurité n'est probablement pas absolue et ne paraît aussi complète que par un effet de contraste.

520. Dans l'azote pur, les résultats sont sensiblement les mêmes que dans l'air; les autres gaz donnent lieu à des variations de forme analogues, mais la couleur est très-différente d'un gaz à l'autre. En même temps, les caractères que nous avons signalés pour les deux pôles sont généralement moins manifestes, et quelquefois il est difficile de distinguer les deux électricités. Faraday a même obtenu une lueur, très-faible il est vrai, dans l'essence de térébenthine.

On répète facilement ces expériences en mettant les deux garnitures de l'œuf électrique en communication avec les deux pôles de la machine de Holtz, soit directement, soit avec une interruption sur le trajet pour provoquer une étincelle auxiliaire. On peut alors mettre l'une ou l'autre des garnitures de l'œuf électrique en communication avec le sol, ou les isoler toutes deux; les apparences ne sont pas sensiblement modifiées.

521. Les bobines d'induction donnent des résultats tout à fait semblables et ici il n'y a plus d'utilité à recourir aux étincelles extérieures puisque, d'après la nature même du phénomène, les décharges sont toujours discontinues. La figure 194 représente, par exemple, les lueurs que l'on obtient à la distance de 30 centimètres avec de l'air à une pression de quelques millimètres. Si la bobine est suffisamment puissante pour franchir cet intervalle, les décharges directes passent seules; l'œuf est traversé par une belle gerbe lumineuse rougeâtre partant de la

boule positive et s'éteignant à quelque distance de la boule négative; celle-ci, ainsi que la tige correspondante, est enveloppée par une auréole violacée formée de trois couches différentes, et séparée de la gerbe par un intervalle obscur.

L'auréole d'un bleu violet qui entoure le pôle négatif dans les décharges des bobines a été signalée d'abord par MM. Masson et Bréguet (1); elle jouit de propriétés curieuses. M. Hittorf (2) a constaté que, dans l'air raréfié à une pression inférieure à 2 millimètres, l'auréole bleue négative se répand d'autant plus que la surface du conducteur qu'elle entoure diminue. Si ce conducteur est formé par un fil affleurant au milieu d'un tube de verre, l'auréole a la forme d'une boule et, lorsque la pression diminue suffisamment, elle peut s'étendre jusqu'à la lueur du pôle positif en supprimant d'une manière complète l'espace obscur qui les séparait. Cette auréole négative paraît être le siège d'une résistance particulière au passage des décharges. Ainsi quand les deux électrodes sont les mêmes et qu'elles sont placées dans un tube de verre renflé au voisinage de l'une d'elles le courant est sensiblement plus intense si le pôle négatif se trouve dans la partie large du tube. M. Hittorf a vérifié d'ailleurs, à l'aide d'un micromètre à étincelles placé en dérivation sur le circuit, qu'avec un tube dont l'une des électrodes A est placée dans une boule sphérique et l'autre B dans un tube cylindrique de diamètre plus petit, la résistance au passage des étincelles est 20 fois plus grande quand le pôle négatif est en B que s'il est en A.

Si le fil qui aboutit d'abord à la sphère est prolongé de manière à se terminer dans l'intérieur du cylindre, il arrive même que la lueur négative ne se produit plus.

522. **Stratifications de la lumière électrique.** — L'étude de la décharge des appareils d'induction a fait découvrir encore un phénomène curieux, observé d'abord par M. Ruhmkorff, puis étudié à peu près à la même époque par M. Quet (3) et par M. Grove (4).

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. IV, p. 145 (1842).
(2) *Pogg. Ann.*, t. CXXXVI, p. 1 et 197. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XVII, p. 487.
(3) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXV, p. 949 (1852).
(4) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXXVII, p. 376 (1853).

Lorsqu'avant de faire le vide dans un œuf électrique on y introduit des vapeurs d'alcool, d'essence de térébenthine ou d'un carbure d'hydrogène quelconque, de sulfure de carbone, de bichlorure d'étain, etc., et qu'on y fait passer les décharges d'une

Fig. 194.

Fig. 195.

bobine, on voit la nappe lumineuse divisée par des bandes obscures nombreuses, normales en chaque point à la direction du jet de lumière dont elles figurent les orthogonales (fig. 195) ; l'auréole négative et l'espace obscur ne paraissent pas modifiés.

Ces strates se produisent dans tous les tubes à gaz raréfiés, et occupent dans chaque cas des positions à peu près fixes, quoiqu'elles éprouvent une sorte de vibration lorsque l'appareil d'induction fonctionne d'une manière continue. La distance des strates et leur éclat dépendent de la nature et de la pression du gaz, des dimensions des tubes et de l'énergie des décharges; elles sont naturellement plus marquées quand la lumière générale est elle-même plus vive, et que le diamètre du tube est plus étroit. La fig. 196 représente un de ces appareils formé d'une succession d'ampoules et de tubes cylindriques; les stratifications s'étendent depuis l'électrode positive jusqu'à une certaine distance de l'électrode négative.

Les mêmes stratifications s'obtiennent par les bouteilles de Leyde, comme l'a montré M. Van der Willigen (1), mais à condition de ralentir la décharge en la faisant passer par une corde mouillée, ou d'employer des charges très-faibles (M. Quet). La machine de Holtz produit quelquefois des strates quand on choisit convenablement les dimensions d'une étincelle auxiliaire, mais on les obtient aisément par l'introduction d'une grande résistance sur le circuit, suivant la méthode de M. Van der Willigen. Enfin, si l'on électrise un tube à gaz raréfié comme on le ferait pour une bouteille de Leyde, en mettant un des fils en communication avec une machine et appliquant sur le tube une feuille d'étain non isolée ou le tenant à la main, on peut observer encore des stratifications très-marquées (MM. Quet et Séguin).

Fig. 196.

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. I, p. 126.

523. L'explication de ces stratifications ne paraît pas encore établie d'une manière définitive. M. Grove considère les étincelles d'une bobine d'induction comme formées par une succession rapide de décharges partielles, ce qui a été confirmé par les observations récentes (456 et 457), et il voit dans les stratifications un phénomène d'interférences entre ces décharges successives de sens contraires, analogues aux interférences des ondes sonores ou lumineuses; il fait remarquer, à l'appui de cette explication, que l'on réussit souvent à supprimer les strates en opérant une rupture brusque du courant inducteur, ou en établissant une interruption sur l'un des fils de communication, interruption dont l'effet serait de supprimer l'un des courants.

Il n'est pas facile de concevoir comment peuvent se produire des interférences entre deux systèmes de décharges qui ne sont pas simultanées mais alternantes, et, si ces deux courants interviennent dans le phénomène, le mécanisme de la production des strates ne doit présenter aucune analogie avec les interférences de la lumière et du son. D'ailleurs, en observant ces strates dans un miroir tournant, M. Fernet a constaté que le phénomène n'est pas stationnaire, comme il le paraît. Dans beaucoup de cas au moins, chacune des électrodes paraît alternativement être l'origine des strates, pendant que l'autre est entourée d'une lueur non stratifiée. Cette alternance du rôle des deux électrodes semble exclure toute idée d'interférence.

En outre, la production des strates, soit par une bouteille de Leyde faiblement chargée ou déchargée par l'intermédiaire d'une grande résistance, soit par les étincelles d'une machine, ne paraît pas compatible avec l'hypothèse d'une interférence entre deux courants opposés.

M. Gaugain (1), remarquant que les stratifications se manifestent surtout avec les gaz combustibles, comme les carbures d'hydrogène, et d'autant plus facilement que ces gaz sont en plus forte proportion, attribue le phénomène à la combustion de ces gaz avec les traces d'air qu'il est impossible d'éviter d'une manière absolue. Dans ce cas, un tube à stratifications devrait finir par s'épuiser quand tout l'oxygène ou les gaz comburants au-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XL, p. 1050.

raient disparu, ce qui ne devrait pas tarder longtemps ; l'expérience ne paraît pas confirmer cette conséquence.

M. Reitlinger [1] admet, d'une manière plus générale, que les strates sont dues à des actions chimiques, combinaisons et décompositions simultanément. Il remarque, par exemple, qu'on n'obtient pas de strates dans les gaz simples, comme l'azote, et qu'il suffit d'introduire dans ce gaz des traces d'hydrogène pour que les stratifications apparaissent. De même, dans un tube à renflements préparé avec de la vapeur d'eau, la lumière des parties étroites montrait les raies de l'hydrogène et le spectre des parties larges était celui de l'oxygène. Dans le vide barométrique ne renfermant que des vapeurs de mercure, il obtint seulement une lumière blanche homogène non stratifiée, tandis que l'introduction de traces d'air faisait apparaître des couches alternatives plus ou moins brillantes. Ce genre d'expériences présente les plus grandes difficultés. On a déjà beaucoup de peine à préparer un gaz sensiblement pur à la pression atmosphérique, c'est-à-dire de façon que les gaz étrangers ne forment qu'une très-faible fraction du mélange. Mais, quand il s'agit d'obtenir dans un tube de verre, à l'aide d'une machine pneumatique, un gaz à la pression de quelques millimètres, toutes les causes d'erreur, condensation de l'eau ou des vapeurs étrangères à la surface des parois du verre, vapeurs que laissent échapper les huiles d'une machine à piston, vapeurs de mercure d'une pompe barométrique, et autres circonstances plus ou moins connues, finissent par acquérir une telle importance, quelque soin que l'on prenne, qu'on ne peut jamais répondre de la pureté ni même quelquefois de la nature du gaz qui reste dans les appareils à étincelles. On conçoit alors combien il est difficile de mettre à l'épreuve de l'expérience une explication basée sur la pureté absolue des gaz qui se trouvent en présence.

MM. Quet et Seguin [2], précisant une idée énoncée d'abord par M. Riess, expliquent les stratifications en admettant que la masse de gaz se subdivise, sous l'influence des deux électrodes, en zones successives électrisées en sens contraires, analogues à celles qu'on observe avec les corps mauvais conducteurs (100), et

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LXVII, p. 114.
[2] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LXV, p. 317.

dont les tubes étincelants donnent une image agrandie. Ces zones successives excercent entre elles des attractions et des répulsions, d'où résulte la formation de couches condensées plus lumineuses et de couches dilatées obscures. On imite d'ailleurs ce phénomène en faisant passer l'étincelle d'induction dans l'air après avoir secoué de la poussière de charbon autour des fils servant à la décharge; l'étincelle prend alors une longueur deux ou trois fois plus grande que d'ordinaire, et elle présente de véritables stratifications transversales avec l'aspect d'un chapelet à grains lumineux. Une flamme fuligineuse placée entre les deux électrodes produit aussi le même effet. Enfin, en appliquant aux extrémités d'une plaque de verre, couverte d'une couche assez mince de poudre de charbon de corne tamisée, les deux fils entre lesquels éclate la décharge, on voit les grains de poussière se mettre en mouvement et se ranger finalement en une série très-régulière de bandes transversales, séparées par des intervalles de 1 à 2 millimètres, qui rappellent complétement les apparences de la lumière stratifiée.

524. De la Rive [1] a étudié de nouveau ce phénomène des stratifications dans les gaz et observé quelques circonstances intéressantes. Contrairement à l'opinion émise par M. Reitlinger, il a obtenu des stratifications dans des gaz simples préparés avec toutes les précautions qui en pouvaient le mieux assurer la pureté. Ainsi, dans l'hydrogène, elles se manifestaient à la pression de 17 millimètres et aux pressions inférieures; dans l'azote, au contraire, l'expérience étant faite avec un tube d'un mètre de longueur, les stratifications n'ont commencé qu'à la pression de 2 millimètres. De la Rive attribue les stratifications à un effet mécanique. « Ce phénomène consisterait, dit-il, dans des contractions et dilatations alternatives du milieu gazeux, produites par la série des décharges toujours plus ou moins discordantes dont le jet électrique est formé. »

On conçoit, en effet, que les décharges électriques, même en les considérant isolément et quel que soit le mode de production, sont toujours un phénomène discontinu, comme l'ont montré directement les expériences de M. Feddersen. D'ailleurs, les oscil-

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. VIII, p. 437.

lations produites dans un tube à stratifications peuvent être assez sensibles pour se transmettre à une colonne de mercure en communication avec le gaz. De la Rive a constaté ainsi, en faisant passer les décharges de la bobine dans un tube de 16 centimètres de long et 5 de diamètre, des oscillations qui pouvaient atteindre une amplitude d'un demi-millimètre.

Les stratifications seraient donc, d'après de la Rive, un phénomène analogue aux ondes sonores, c'est-à-dire un phénomène mécanique provenant d'une succession d'impulsions isochrones exercées sur la colonne gazeuse raréfiée, ce qui présente quelques analogies avec la théorie de M. Grove. Comme nouvelle preuve à l'appui de cette explication, de la Rive cite encore le trouble qu'éprouvent les stratifications quand on introduit une nouvelle quantité de gaz dans le tube en l'y faisant entrer au voisinage de l'une ou l'autre des électrodes; mais des perturbations de cette nature sont faciles à prévoir et doivent être compatibles avec une théorie quelconque. La question, en définitive, ne paraît pas encore résolue.

525. De la Rive a observé aussi d'autres phénomènes que présentent les différentes parties du jet électrique stratifié, ce sont des variations de résistance et de température.

Pour déterminer les changements de résistance, il introduit dans le tube à gaz deux disques de platine de 7^{mm} de diamètre placés normalement au tube et à 3 centimètres l'un de l'autre. Ces deux disques sont reliés ensemble par un corps mauvais conducteur et communiquent séparément avec deux fils qui vont à un galvanomètre. L'ensemble des deux disques constitue une sorte de *sonde électrique;* il forme, en effet, avec le fil du galvanomètre, un circuit dérivé dans lequel passe une fraction de la décharge d'autant plus grande que l'intervalle compris entre les deux disques offre plus de résistance.

La sonde étant placée dans le voisinage de l'une des électrodes, on peut, en manœuvrant le commutateur de la bobine, faire en sorte qu'elles soient plongées alternativement dans l'espace obscur qui sépare les deux nappes lumineuses, ou dans l'auréole stratifiée qui émane de l'électrode positive. Voici le résumé de quelques expériences :

NATURE DU GAZ	PRESSION	DÉVIATION DU GALVANOMÈTRE	
		SONDE A L'ÉLECTRODE POSITIVE	SONDE A L'ÉLECTRODE NÉGATIVE
Azote ou air. . .	6mm	70°	18°
	4	40	8
	2	18	3
Hydrogène. . . .	15	90	90
	6	82	65
	4	52	2
	2	35	0

On voit par ce tableau : 1° que, dans les limites des observations, la résistance du gaz en un point quelconque va constamment en diminuant à mesure que la pression elle-même diminue, ce que nous avons déjà vu ; 2° que la conductibilité du gaz est généralement plus grande dans la zone obscure voisine de l'électrode négative que près de l'électrode positive. La différence des conductibilités de ces deux régions est d'autant plus sensible que la pression est plus faible ; dans le cas de l'hydrogène à la pression de 2mm, la déviation du galvanomètre était absolument inappréciable quand la sonde était dans l'espace obscur.

En réalité, la résistance va en croissant d'une manière continue depuis la zone obscure jusqu'à l'électrode positive. Ainsi, en plaçant les sondes à un tiers de distance de l'une des électrodes, dans l'azote à la pression de 2mm, la déviation du galvanomètre a été de 8° ou 12°, suivant que l'électrode la plus voisine des sondes était négative ou positive.

526. Ce maximum de conductibilité dans la zone obscure correspond en même temps à une élévation de température beaucoup moindre. De la Rive a placé dans un tube à gaz de 16 centimètres de longueur et 4 centimètres de diamètre deux thermomètres à mercure situés à une distance d'un centimètre de chacune des électrodes, distance bien suffisante pour les mettre à l'abri de l'influence de ces conducteurs ; les électrodes étaient terminées par des boules métalliques d'un centimètre de diamètre et n'éprouvaient aucun échauffement sensible par le passage des

décharges. La température initiale des thermomètres était environ de 18° à 20° Réaumur, et on a noté l'échauffement produit après que les décharges avaient passé pendant deux minutes.

NATURE DU GAZ	PRESSION	ÉCHAUFFEMENT DES THERMOMÈTRES		DIFFÉRENCE
		ÉLECTRODE POSITIVE	ÉLECTRODE NÉGATIVE	
Air. . . .	2mm	9°	5°	4°
	4	13	7,5	5,5
	6	14	8	6
	8	13	9,5	3,5
	10	13	10	3
	15	12,5	10,5	2
	20	9	9	0
Hydrogène.	2	6	4	2
	5	8,5	5,5	3
	6	9	5,5	3,5
	9	11	6,5	4,5
	15	9	5	4
	20	7,5	5	2,5
	30	4	2,5	1,5

La différence des élévations de température est en général un peu moindre pour l'hydrogène que pour l'azote ou l'air, mais elle est toujours très-manifeste.

Si l'expérience dure plus longtemps, il est clair que l'échauffement doit augmenter encore jusqu'à un maximum où il est compensé par le rayonnement du thermomètre, comme on le voit par les expériences suivantes faites avec de l'air à la pression de 5 millimètres.

DURÉE DES DÉCHARGES	ÉCHAUFFEMENT DES THERMOMÈTRES		DIFFÉRENCE
	ÉLECTRODE POSITIVE	ÉLECTRODE NÉGATIVE	
2 minutes.	13°	8°	5°
4 »	19	12,5	6,5
6 »	22	14	8
8 »	24	15	9
10 »	25	16	9

Toutefois, De la Rive énonce dans son mémoire la proposition suivante qui peut laisser quelques doutes.

« A mesure que la durée de l'expérience augmente et que la température absolue s'élève, les différences entre les températures indiquées par chacun des thermomètres deviennent proportionnellement moindres ; les indications des deux thermomètres finiront par se rapprocher et même par devenir les mêmes au bout d'un certain temps. »

Il paraît difficile de comprendre que les températures finales des thermomètres soient les mêmes si les deux couches de gaz sont inégalement chaudes, à moins que la différence des températures ne soit exactement compensée par la plus grande masse de la couche la plus froide, ce qui ne pourrait être qu'une pure coïncidence.

On peut remarquer, en terminant, qu'une élévation de température de 25° d'un thermomètre dont la masse est énorme par rapport à celle du gaz qui l'entoure, fait présumer que la température du gaz est elle-même excessivement élevée.

527. **Intensité lumineuse des étincelles. — Expériences de Masson.** — Masson (1) a cherché à déterminer suivant quelles lois varie l'intensité lumineuse des étincelles produites par les décharges de batteries. Pour cela, il lui fallut d'abord trouver un photomètre qui permît de comparer les intensités de deux lumières instantanées comme des étincelles électriques ; pour éviter ensuite la difficulté de produire deux décharges simultanées, Masson prit une lumière fixe comme terme de comparaison intermédiaire entre les étincelles successives. Le photomètre de Masson se composait d'un disque, à secteurs alternativement blancs et noirs, animé d'un mouvement rapide de rotation. Si ce disque est éclairé par une lumière continue, les secteurs disparaissent à cause de la persistance des impressions sur la rétine, et l'on aperçoit un cercle d'un éclairage uniforme. Si, le disque tournant dans l'obscurité, on l'éclaire subitement par une lumière instantanée comme une étincelle, les secteurs blancs et noirs apparaissent comme si l'appareil était immobile. Enfin, si le disque est éclairé par une lumière continue et si on l'éclaire en même

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XIV, p. 129.

temps par une lumière instantanée, on pourra, suivant l'intensité ou la distance de cette dernière source, distinguer ou non la différence d'éclat des secteurs.

Masson fit quelques expériences préliminaires pour déterminer la sensibilité de l'œil à ce genre d'observations. Sur un disque blanc on dessine une portion de secteur noir n'allant pas jusqu'au centre et on fait tourner le disque avec rapidité. Si l'angle du secteur noir est assez grand, on verra un cercle central blanc entouré d'un anneau plus sombre correspondant au secteur; en changeant successivement l'angle de ce secteur, on pourra déterminer quelle est la largeur maximum qu'il puisse atteindre sans qu'il soit possible de distinguer l'anneau gris de la tache centrale. Si alors le secteur noir occupe $\frac{1}{100}$ de la circonférence, la différence d'éclat des deux zones sera de $\frac{1}{100}$; on en conclura que l'œil peut évaluer à $\frac{1}{100}$ près l'égalité de deux éclairements ou juger une différence d'intensité de $\frac{1}{100}$. L'expérience indique que les vues faibles n'apprécient pas une différence d'éclat inférieur à $\frac{1}{60}$ ou $\frac{1}{70}$, que la sensibilité des vues ordinaires est comprises entre $\frac{1}{80}$ et $\frac{1}{100}$, et qu'une très-bonne vue peut saisir des différences de $\frac{1}{120}$ et même au delà.

Masson a constaté que la sensibilité d'une vue ne dépend pas de l'intensité de l'éclairage ni de la couleur, pourvu que la lumière ne soit pas trop faible, et qu'elle est aussi grande pour les lumières instantanées que pour les lumières fixes.

Il résulte de là que, si un disque à secteurs blancs et noirs est éclairé simultanément par une lumière fixe et par une lumière instantanée comme une étincelle électrique, et si l'on détermine la distance minimum à laquelle il faut éloigner cette dernière pour que les secteurs cessent d'être visibles, l'éclairement que produit l'étincelle est alors une fraction *constante pour chaque œil*, mais variable d'une vue à une autre, de l'éclairement de la lampe.

528. L'appareil est disposé de la manière suivante.

Le disque est mû par un mouvement d'horlogerie et fait au moins 100 tours par seconde; on l'observe avec une lunette dirigée normalement à son plan. Les deux sources de lumière, une lampe Carcel et un micromètre à étincelles, sont mobiles sur deux règles graduées, et chacune des sources éclaire le disque

sous l'angle de 45°. Pour obtenir une série d'étincelles identiques, on met une boule du micromètre en communication avec l'une des armatures d'un condensateur, et la seconde boule en communication avec l'autre armature et le sol. L'armature isolée est électrisée d'une manière continue par une machine électrique en mouvement, et se décharge successivement par le micromètre. Les communications sont même disposées de telle manière, que la résistance totale du circuit reste constante malgré les déplacements du micromètre.

Dans ces conditions, la lampe étant fixe, la position limite du micromètre, pour laquelle les secteurs noirs cessent de paraître au moment de chaque étincelle, peut être déterminée en général à 1 ou 2 centimètres près, quand la distance varie entre 30 et 120 centimètres; l'erreur expérimentale moyenne est donc généralement inférieure à $\frac{1}{20}$.

Comme Masson voulait étudier en particulier l'influence de la forme et des dimensions des condensateurs, il les préparait lui-même avec le plus grand soin. C'étaient toujours des condensateurs plans, carrés, rectangles ou circulaires, formés de plateaux de verre d'épaisseurs différentes, recouverts de feuilles d'étain sur une partie de leur surface. Avec les appareils ordinaires, il s'échappe souvent des bords des armatures des lueurs rougeâtres qui indiquent une perte d'électricité. Pour éviter cet inconvénient, Masson recouvrait les bords de la lame de verre, et même une partie des feuilles d'étain, par une couche de cire d'Espagne ou d'un mélange de cire et de gomme laque coulé à chaud, de 2 millimètres au moins d'épaisseur et 4 à 5 centimètres de largeur.

529. Masson a démontré d'abord, par expérience, que l'éclairement limite de l'étincelle est une fraction constante de l'éclairement de la lampe, en vérifiant que l'éclairement de l'étincelle ainsi évalué est en raison inverse du carré de la distance.

Soit I l'intensité de la lampe, E celle des étincelles électriques; L la distance de la lampe au disque et R celle du micromètre au moment où les secteurs disparaissent; f le rapport de l'éclairement des étincelles à celui de la lampe, on a alors

$$\frac{E}{R^2} = f\frac{I}{L^2}. \qquad (1)$$

Si on place la lampe à la distance $L + l$, la nouvelle distance limite $R + r$ de l'étincelle devra encore satisfaire à l'équation

$$(2) \qquad \frac{E}{(R+r)^2} = f\,\frac{I}{(L+l)^2}.$$

On déduit de ces deux équations

$$\sqrt{\frac{E}{fI}} = \frac{R}{L} = \frac{R+r}{L+l} = \frac{r}{l}.$$

Le rapport des deux distances, ou le rapport de leurs accroissements, doit donc être constant; si la distance L croit en progression arithmétique, il en sera de même pour la distance R. Les expériences suivantes donneront une idée exacte de la précision que comporte le phénomène.

DISTANCE DU DISQUE		ACCROISSEMENT		$\frac{L}{R}$
A LA LAMPE L	AU MICROMÈTRE R	DE L	DE R	
540mm	407	»	»	1,32
640	489	100	82	1,30
740	569	100	80	1,30
840	648	100	79	1,29
940	737	100	89	1,28
1040	826	100	89	1,25

Il y a ici une diminution continue du rapport $\frac{L}{R}$ qui tient sans doute à un affaiblissement graduel de l'intensité des étincelles. La même propriété a été vérifiée d'ailleurs par un grand nombre d'autres expériences.

530. L'équation (1) montre aussi que, si la lampe reste fixe, l'intensité E de la lumière électrique est proportionnelle au carré de la distance limite R; il suffira donc de déterminer comment varie cette distance sous l'influence de diverses circonstances.

Voici, par exemple, une série d'expériences dans laquelle la distance explosive a été seule modifiée.

DISTANCE EXPLOSIVE d	DISTANCE DU DISQUE AU MICROMÈTRE R	DIFFÉRENCES	$\frac{R}{d}$
mm.			
2,5	400mm	»	160
3,5	565	165	161
4,5	724	159	160
5,5	892	168	162
6,5	1051	159	161
7,5	1220	169	160

Il résulte de là que les distances R et d sont proportionnelles et, par conséquent, que *l'intensité lumineuse de la décharge est proportionnelle au carré de la distance explosive.*

531. Laissant ensuite la distance explosive constante, Masson a employé des condensateurs de même épaisseur et de surfaces très-différentes, la forme de ces surfaces n'ayant aucune influence. Voici encore, comme exemple, une série d'expériences où la distance explosive était de 5 millimètres et l'épaisseur des lames de verre d'environ $1^{mm},85$.

RACINE CARRÉE DE LA SURFACE $\sqrt{s}$	DISTANCE DU DISQUE AU MICROMÈTRE R	$\frac{R}{\sqrt{s}}$
150mm	454mm	3,03
200	584	2,92
244	687	2,82
283	876	3,10

L'égalité des rapports de la dernière colonne montre que *l'intensité lumineuse de l'étincelle est proportionnelle à la surface du condensateur.*

532. Enfin, les expériences suivantes ont été faites avec des cadres carrés de 300 millimètres de côté formés par des verres d'épaisseurs différentes, la distance explosive restant toujours constante.

ÉPAISSEUR DU VERRE e	$\sqrt{e}$	DISTANCE DU DISQUE AU MICROMÈTRE R	$R\sqrt{e}$
mm.			
1,51	1,14	679	774
1,83	1,35	589	795
2,51	1,57	518	813
2,75	1,65	459	757
3,24	1,80	404	727

L'accord des expériences est ici moins satisfaisant; il en résulte cependant que *l'intensité lumineuse de l'étincelle est en raison inverse de l'épaisseur de la lame isolante.*

533. Ces trois premières lois peuvent être représentées par la formule suivante, où K est un facteur constant,

$$E = K\frac{d^2 s}{e}.$$

La distance explosive, dans les expériences de Masson, n'a pas dépassé les limites entre lesquelles elle est sensiblement proportionnelle à la différence des potentiels. Or, nous avons vu que, pour des condensateurs plans (178), la différence V des potentiels des armatures est proportionnelle à la charge électrique M, à la distance des armatures e et en raison inverse de la surface s. On peut donc remplacer, dans la formule précédente, le facteur d^2 par V^2 et le rapport $\frac{s}{e}$ par $\frac{M}{V}$; il vient alors, en désignant par h une nouvelle constante,

$$E = hMV.$$

Par conséquent, on peut résumer les résultats des expérienc d'une manière très-simple en disant que, lorsqu'une décha électrique s'effectue dans un circuit constant, entre deux boı métalliques données, *l'intensité lumineuse de l'étincelle est p portionnelle à l'énergie électrique.*

D'autres expériences ont été faites en ménageant sur le ci deux ou trois interruptions, mais les lois empiriques pa quelles Masson en a résumé les résultats ne paraissent po se rattacher à aucune considération théorique.

534. Masson (1) a fait varier aussi la résistance du circuit, en intercalant sur le trajet de la décharge un fil de cuivre de $0^{mm},6$ de diamètre. A mesure que la longueur du fil intercalé augmente, l'intensité lumineuse des étincelles diminue de plus en plus, et les lois relatives aux dimensions du condensateur et à la distance explosive restent vraies pour chaque circuit particulier.

Pour évaluer l'influence de la résistance, nous pouvons admettre, d'après la loi générale établie plus haut, que l'intensité lumineuse de la décharge est proportionnelle à l'énergie électrique dépensée au point où elle a lieu, c'est-à-dire en raison inverse de la résistance totale du circuit, si la distance explosive reste constante. Appelons R_0 la distance limite du micromètre pour le cas où il n'y a pas de fil intercalé, λ la longueur du fil ajouté, R la distance limite correspondante, et λ_1 la longueur du même fil équivalente à la portion du circuit restée constante; on devra avoir

$$R_0 \lambda_1 = R^2 (\lambda_1 + \lambda),$$

et cette équation permettra de déterminer la résistante constante λ_1. Dans le tableau suivant, qui renferme des moyennes de plusieurs observations, on a déterminé ainsi la résistance constante λ_1, en comparant la première expérience de chaque série à toutes les autres successivement.

LONGUEUR DE FIL AJOUTÉ λ	DISTANCE EXPLOSIVE d	DISTANCE DU DISQUE AU MICROMÈTRE R	λ_1
mètres	mm.		mètres
»	4,5	873	»
24	»	471	9,86
39	»	375	8,85
60	»	327	9,78
63	»	296	8,19
20	5,5	597	»
39	»	500	24,6
20	6,5	704	»
39	»	596	28,3

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXX, p. 5.

La valeur de λ_1 étant sensiblement constante dans la première série, il semble résulter de là que *l'intensité lumineuse est en raison inverse de la résistance totale du circuit.*

Les expériences suivantes montrent, d'ailleurs, que la distance explosive intervient pour une grande part dans la résistance de la partie constante. Si l'on admet que la résistance du condensateur et des conducteurs fixes est négligeable et que λ_1 représente simplement la résistance de l'étincelle, la fraction de la chaleur totale qui se dégage dans l'étincelle devra être, d'après les lois de M. Riess (407), égale à $\frac{\lambda_1}{\lambda + \lambda_1}$; toutefois la résistance calculée λ_1 varie de telle manière, dans les trois séries d'expériences, qu'elle ne paraît pas devoir être attribuée simplement à la distance explosive.

535. Enfin, les étincelles ne sont pas également éclatantes quand on modifie la nature des conducteurs entre lesquels a lieu l'explosion. Masson a déterminé, en employant des boules de métaux différents et de même diamètre, quelle devait être la distance explosive pour qu'avec un même condensateur les étincelles eussent des intensités égales.

NATURE DES BOULES	DISTANCE EXPLOSIVE		MOYENNE
	1re SÉRIE	2e SÉRIE	
	mm.	mm.	
Cuivre.	5,21	5,27	5,24
Fer.	5,05	5,48	5,25
Laiton.	4,97	5,21	5,09
Zinc.	4,62	4,87	4,75
Étain.	3,69	4,89	4,29
Plomb.	3,50	4,15	3,82

Laissant ensuite la distance explosive constante dans une même série, il a cherché à quelles distances devait être placé le micromètre dans chaque cas pour produire le même éclairement, et il a obtenu des résultats analogues.

On voit que les métaux se partagent en deux groupes : le cuivre, le fer et le laiton, d'une part, et, d'autre part, le zinc, l'étain et le plomb, lesquels donnent des étincelles sensiblement plus

brillantes. Masson a cherché suivant quelle propriété ces métaux pourraient être réunis encore en deux groupes semblables et n'a trouvé que la ténacité. Il ne semble pas que la résistance à la traction puisse suffire à expliquer l'arrachement inégal des particules que les décharges électriques enlèvent aux conducteurs et leurs différences d'éclat; c'est là un phénomène complexe qui tient à la volatilisation plus ou moins facile des différents métaux et surtout à la couleur propre de chaque vapeur. La lumière de l'étincelle est due, en effet, à l'incandescence des vapeurs métalliques, comme nous le verrons bientôt, et il suffit d'examiner à la loupe les conducteurs dont on a tiré de nombreuses étincelles pour y constater des altérations et des cavités plus ou moins profondes.

536. **Composition de la lumière électrique.** — On sait que Wollaston (1), en observant une fente étroite éclairée par la lumière solaire au travers d'un prisme de flint privé de veines, découvrit dans le spectre quelques lignes obscures qui paraissaient être la séparation de couleurs différentes. De même, la lumière bleue de la flamme d'une bougie, au lieu de donner une série de couleurs réunies par des teintes continues, lui parut divisée en cinq images de couleurs différentes, séparées les unes des autres par des intervalles obscurs. Enfin, « lorsque l'objet examiné, dit-il, est une ligne bleue de lumière électrique, j'ai vu aussi le spectre séparé en plusieurs images, mais le phénomène est un peu différent du précédent. » Frauenhofer (2), qui ne paraît pas avoir eu connaissance de la découverte de Wollaston, examina le spectre solaire avec une lunette et y aperçut un très-grand nombre de raies obscures plus ou moins intenses, dont il publia une belle table; il désigna quelques-unes des plus remarquables par des lettres, pour servir de points de repère dans la mesure des indices de réfraction. En éclairant la fente de son appareil par la flamme d'une bougie ou d'une lampe, il ne vit plus qu'un spectre éclairé d'une manière continue, sauf dans le jaune où se montrait une ligne double brillante, dont la position correspondait exactement à une double ligne noire du spectre solaire, qu'il avait désignée par la lettre D et qu'on sait maintenant

(1) *Phil. trans.* (1802), p. 365.
(2) *Schumacher's astronomische Abhandlungen*, 2e partie, p. 23 et 44.

appartenir au sodium. Mais « la lumière électrique est, dit-il, par rapport aux lignes et aux raies du spectre, très-différente de la lumière du soleil et d'une lampe. On rencontre, dans le spectre de cette lumière, plusieurs lignes en partie très-claires, dont l'une dans le vert, en comparaison avec les autres parties du spectre, paraît très-brillante. Une autre, qui n'est pas tout à fait si luisante, se trouve dans l'orangé; elle paraît être de la même couleur que la ligne claire du spectre de la lampe, mais elle est beaucoup plus réfractée. Vers l'extrémité du spectre, on aperçoit dans le rouge une raie de peu de clarté. Dans le reste du spectre on peut encore distinguer facilement quatre raies assez claires. »

537. **Expériences de M. Wheatstone.** — Wollaston ni Frauenhofer ne se prononcent sur la cause des raies brillantes qui se manifestent dans le spectre de la lumière électrique ; M. Wheatstone (1) a examiné le même phénomène à l'aide d'un appareil magnéto-électrique qui donnait des étincelles plus fixes. Avec l'étincelle tirée du mercure, il a observé dans le spectre sept bandes définies séparées les unes des autres par des intervalles obscurs; en tirant les étincelles d'électrodes de zinc, de cadmium, de plomb et de bismuth, il a constaté que le nombre et la position des bandes dépendent de la nature des métaux. Cette influence des électrodes est tellement grande que, si l'étincelle part entre deux boules de métaux différents, on aperçoit simultanément les raies brillantes caractéristiques de chacun des métaux. Enfin les résultats ne sont pas modifiés quand le passage de l'étincelle a lieu dans le vide de Torricelli, dans l'air, l'acide carbonique ou l'oxygène. M. Wheatstone conclut de ses recherches que la lumière électrique est le résultat de la volatilisation et de l'ignition (mais non de la combustion) de la matière pondérable du conducteur. Cette conclusion est importante à signaler parce qu'elle n'est autre chose que le principe de l'analyse spectrale énoncé pour la première fois dans la science; toutefois il n'est pas absolument exact que la nature du milieu ambiant, dans le cas des étincelles électriques, n'intervienne pas aussi dans la composition du spectre.

(1) *Associat. britann. pour l'avancement des sciences.* Dublin (1835).

519. Si la garniture supérieure de l'œuf est mise en communication directe avec le conducteur de la machine ou terminée par une pointe qui donne un flux continu, la décharge ne se produit plus à une aussi grande distance; la boule positive donne une gerbe de lumière pourpre, la boule négative est enveloppée d'une auréole violacée, mais la gerbe et l'auréole sont séparées par un intervalle complétement obscur, au moins par comparaison avec les portions voisines (fig. 194). Cet espace plus sombre qui s'observe dans tous les gaz est nécessairement le siége d'un mouvement des fluides électriques, et c'est là ce que Faraday appelle la *décharge obscure*. Toutefois, il est difficile d'affirmer qu'il ne s'y produise aucune apparence lumineuse; l'obscurité n'est probablement pas absolue et ne paraît aussi complète que par un effet de contraste.

520. Dans l'azote pur, les résultats sont sensiblement les mêmes que dans l'air; les autres gaz donnent lieu à des variations de forme analogues, mais la couleur est très-différente d'un gaz à l'autre. En même temps, les caractères que nous avons signalés pour les deux pôles sont généralement moins manifestes, et quelquefois il est difficile de distinguer les deux électricités. Faraday a même obtenu une lueur, très-faible il est vrai, dans l'essence de térébenthine.

On répète facilement ces expériences en mettant les deux garnitures de l'œuf électrique en communication avec les deux pôles de la machine de Holtz, soit directement, soit avec une interruption sur le trajet pour provoquer une étincelle auxiliaire. On peut alors mettre l'une ou l'autre des garnitures de l'œuf électrique en communication avec le sol, ou les isoler toutes deux; les apparences ne sont pas sensiblement modifiées.

521. Les bobines d'induction donnent des résultats tout à fait semblables et ici il n'y a plus d'utilité à recourir aux étincelles extérieures puisque, d'après la nature même du phénomène, les décharges sont toujours discontinues. La figure 194 représente, par exemple, les lueurs que l'on obtient à la distance de 30 centimètres avec de l'air à une pression de quelques millimètres. Si la bobine est suffisamment puissante pour franchir cet intervalle, les décharges directes passent seules; l'œuf est traversé par une belle gerbe lumineuse rougeâtre partant de la

boule positive et s'éteignant à quelque distance de la boule négative; celle-ci, ainsi que la tige correspondante, est enveloppée par une auréole violacée formée de trois couches différentes, et séparée de la gerbe par un intervalle obscur.

L'auréole d'un bleu violet qui entoure le pôle négatif dans les décharges des bobines a été signalée d'abord par MM. Masson et Bréguet (1); elle jouit de propriétés curieuses. M. Hittorf (2) a constaté que, dans l'air raréfié à une pression inférieure à 2 millimètres, l'auréole bleue négative se répand d'autant plus que la surface du conducteur qu'elle entoure diminue. Si ce conducteur est formé par un fil affleurant au milieu d'un tube de verre, l'auréole a la forme d'une boule et, lorsque la pression diminue suffisamment, elle peut s'étendre jusqu'à la lueur du pôle positif en supprimant d'une manière complète l'espace obscur qui les séparait. Cette auréole négative paraît être le siége d'une résistance particulière au passage des décharges. Ainsi, quand les deux électrodes sont les mêmes et qu'elles sont soudées dans un tube de verre renflé au voisinage de l'une d'elles, le courant est sensiblement plus intense si le pôle négatif se trouve dans la partie large du tube. M. Hittorf a vérifié d'ailleurs, à l'aide d'un micromètre à étincelles placé en dérivation sur le circuit, qu'avec un tube dont l'une des électrodes A est placée dans une boule sphérique et l'autre B dans un tube cylindrique de diamètre plus petit, la résistance au passage des étincelles est 20 fois plus grande quand le pôle négatif est en B que s'il est en A.

Si le fil qui aboutit d'abord à la sphère est prolongé de manière à se terminer dans l'intérieur du cylindre, il arrive même que la lueur négative ne se produit plus.

522. **Stratifications de la lumière électrique.** — L'étude de la décharge des appareils d'induction a fait découvrir encore un phénomène curieux, observé d'abord par M. Ruhmkorff, puis étudié à peu près à la même époque par M. Quet (3) et par M. Grove (4).

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. IV, p. 145 (1842).
(2) *Pogg. Ann.*, t. CXXXVI, p. 1 et 197. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XVII, p. 487.
(3) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXV, p. 949 (1852).
(4) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXXVII, p. 376 (1853).

Lorsqu'avant de faire le vide dans un œuf électrique on y introduit des vapeurs d'alcool, d'essence de térébenthine ou d'un carbure d'hydrogène quelconque, de sulfure de carbone, de bichlorure d'étain, etc., et qu'on y fait passer les décharges d'une

Fig. 194.

Fig. 195.

bobine, on voit la nappe lumineuse divisée par des bandes obscures nombreuses, normales en chaque point à la direction du jet de lumière dont elles figurent les orthogonales (fig. 195) ; l'auréole négative et l'espace obscur ne paraissent pas modifiés.

tricité maintenue en réserve sur le condensateur, de sorte que la décharge correspond à une quantité d'électricité beaucoup plus grande. Nous reviendrons plus tard avec quelques détails sur le rôle du condensateur appliqué aux bobines d'induction. Cette nouvelle méthode a donné des spectres caractérisés par les mêmes raies, de sorte que Masson était autorisé, comme M. Wheatstone et à la suite d'expériences plus complètes, à terminer son mémoire par la conclusion suivante :

« La constitution des spectres électriques est pour une même substance, employée comme pôles, indépendante de la source électrique et du milieu dans lequel jaillit l'étincelle [1]. »

M. Grove [2] et M. Poggendorff [3] eurent aussi, à la même époque, l'idée d'appliquer le condensateur à la bobine d'induction afin d'en tirer des étincelles très-éclatantes.

Pour obtenir par ce moyen une grande quantité de lumière, il faut augmenter autant que possible le débit d'électricité, afin de pouvoir accroître beaucoup la capacité des condensateurs. On emploie, par exemple, une puissante bobine d'induction capable de donner des étincelles de 30 à 40 centimètres, puis, comme courant inducteur, une pile composée d'un nombre d'éléments double de celui que peut supporter l'appareil quand on veut tirer de longues étincelles, ce qui n'offre ici aucun inconvénient, et l'on fait communiquer les pôles du fil induit avec les armatures d'une batterie assez grande pour que la distance explosive soit réduite à quelques millimètres. Dans ces conditions, on obtient une succession rapide de décharges éclatantes; la lumière est assez vive pour que le spectre puisse être projeté sur un tableau et rendu visible à un nombreux auditoire.

541. **Caractères spectroscopiques des différentes formes de la décharge.** — Si l'on veut se borner à étudier les spectres des métaux par l'étincelle électrique et faire la table des raies avec un spectroscope, il n'est pas nécessaire d'avoir un aussi grand éclat et l'on peut se servir d'une bobine de dimensions moyennes. C'est là le procédé généralement employé depuis les mémorables tra-

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XLV, p. 410.

[2] *Phil. Mag.*, 4e série, t. IX, p. 1. — *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XLIII, p. 379.

[3] *Pogg. Annal.*, t. XCIV, p. 325. — *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XLIV, p. 382.

523. L'explication de ces stratifications ne paraît pas encore établie d'une manière définitive. M. Grove considère les étincelles d'une bobine d'induction comme formées par une succession rapide de décharges partielles, ce qui a été confirmé par les observations récentes (456 et 457), et il voit dans les stratifications un phénomène d'interférences entre ces décharges successives de sens contraires, analogues aux interférences des ondes sonores ou lumineuses; il fait remarquer, à l'appui de cette explication, que l'on réussit souvent à supprimer les strates en opérant une rupture brusque du courant inducteur, ou en établissant une interruption sur l'un des fils de communication, interruption dont l'effet serait de supprimer l'un des courants.

Il n'est pas facile de concevoir comment peuvent se produire des interférences entre deux systèmes de décharges qui ne sont pas simultanées mais alternantes, et, si ces deux courants interviennent dans le phénomène, le mécanisme de la production des strates ne doit présenter aucune analogie avec les interférences de la lumière et du son. D'ailleurs, en observant ces strates dans un miroir tournant, M. Fernet a constaté que le phénomène n'est pas stationnaire, comme il le paraît. Dans beaucoup de cas au moins, chacune des électrodes paraît alternativement être l'origine des strates, pendant que l'autre est entourée d'une lueur non stratifiée. Cette alternance du rôle des deux électrodes semble exclure toute idée d'interférence.

En outre, la production des strates, soit par une bouteille de Leyde faiblement chargée ou déchargée par l'intermédiaire d'une grande résistance, soit par les étincelles d'une machine, ne paraît pas compatible avec l'hypothèse d'une interférence entre deux courants opposés.

M. Gaugain (1), remarquant que les stratifications se manifestent surtout avec les gaz combustibles, comme les carbures d'hydrogène, et d'autant plus facilement que ces gaz sont en plus forte proportion, attribue le phénomène à la combustion de ces gaz avec les traces d'air qu'il est impossible d'éviter d'une manière absolue. Dans ce cas, un tube à stratifications devrait finir par s'épuiser quand tout l'oxygène ou les gaz comburants au-

(1) *Compte rendus de l'Académie des sciences*, t. XL, p. 1056.

raient disparu, ce qui ne devrait pas tarder longtemps ; l'expérience ne paraît pas confirmer cette conséquence.

M. Reitlinger (1) admet, d'une manière plus générale, que les strates sont dues à des actions chimiques, combinaisons et décompositions simultanément. Il remarque, par exemple, qu'on n'obtient pas de strates dans les gaz simples, comme l'azote, et qu'il suffit d'introduire dans ce gaz des traces d'hydrogène pour que les stratifications apparaissent. De même, dans un tube à renflements préparé avec de la vapeur d'eau, la lumière des parties étroites montrait les raies de l'hydrogène et le spectre des parties larges était celui de l'oxygène. Dans le vide barométrique ne renfermant que des vapeurs de mercure, il obtint seulement une lumière blanche homogène non stratifiée, tandis que l'introduction de traces d'air faisait apparaître des couches alternatives plus ou moins brillantes. Ce genre d'expériences présente les plus grandes difficultés. On a déjà beaucoup de peine à préparer un gaz sensiblement pur à la pression atmosphérique, c'est-à-dire de façon que les gaz étrangers ne forment qu'une très-faible fraction du mélange. Mais, quand il s'agit d'obtenir dans un tube de verre, à l'aide d'une machine pneumatique, un gaz à la pression de quelques millimètres, toutes les causes d'erreur, condensation de l'eau ou des vapeurs étrangères à la surface des parois du verre, vapeurs que laissent échapper les huiles d'une machine à piston, vapeurs de mercure d'une pompe barométrique, et autres circonstances plus ou moins connues, finissent par acquérir une telle importance, quelque soin que l'on prenne, qu'on ne peut jamais répondre de la pureté ni même quelquefois de la nature du gaz qui reste dans les appareils à étincelles. On conçoit alors combien il est difficile de mettre à l'épreuve de l'expérience une explication basée sur la pureté absolue des gaz qui se trouvent en présence.

MM. Quet et Seguin (2), précisant une idée énoncée d'abord par M. Riess, expliquent les stratifications en admettant que la masse de gaz se subdivise, sous l'influence des deux électrodes, en zones successives électrisées en sens contraires, analogues à celles qu'on observe avec les corps mauvais conducteurs (100), et

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LXVII, p. 114.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LXV, p. 317.

partie confirmée par l'expérience, on admet que les premières radiations émises par un corps que l'on échauffe peu à peu sont d'abord simplement calorifiques, peu réfrangibles et caractérisées par de grandes longueurs d'onde. A mesure que la température s'élève, en même temps que l'intensité des premières radiations augmente, il s'en manifeste de nouvelles dont la longueur d'onde diminue de plus en plus, et dont la réfraction augmente d'une manière régulière. Ces nouvelles radiations deviennent bientôt lumineuses et finissent ensuite par envahir le spectre chimique. Toutes choses égales d'ailleurs, la richesse d'une source de lumière en radiations chimiques, ou à courtes longueurs d'onde, est d'autant plus grande que la température est plus élevée. Il semblerait résulter de là que la température des vapeurs rendues incandescentes par les décharges électriques doit être notablement supérieure à celle du soleil, puisque ces vapeurs possèdent un spectre chimique plus étendu; car les conditions sont tout à fait comparables à cause des vapeurs métalliques qui existent en grande abondance à la surface du soleil. Cette proposition n'a rien en soi de contradictoire ni même d'improbable; on ignore, en effet, quelle peut être la température des étincelles et l'on admet volontiers que la température du soleil n'est pas hors de proportion avec celles que l'on peut réaliser dans les expériences de laboratoire. Néanmoins, l'absence de rayons très-réfrangibles dans la lumière qui nous vient du soleil ne suffit pas pour résoudre cette question, car il est possible que ces rayons, s'ils existent, soient en très-grande partie absorbés par l'atmosphère terrestre et ne puissent parvenir jusqu'à nous, du moins sans avoir été transformés.

544. Toutefois la multiplication des radiations émises par une source de lumière ne se fait pas exactement dans l'ordre indiqué par M. Draper, au moins quand il s'agit de vapeurs incandescentes, comme les gaz qui brûlent sans donner de produits solides, ou les corps volatilisés par l'électricité. Quand on volatilise un sel de soude dans un chalumeau à oxygène (1), on constate d'abord dans le spectre, à mesure que la température s'élève, 5 ou 6 groupes de raies de couleurs différentes, tout à fait ana-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXIX, p. 337.

logues à la double raie D qui caractérise seule la présence du sodium dans les flammes à température peu élevée ; puis la lumière générale augmente de plus en plus et le spectre s'illumine dans toute son étendue. On obtient exactement les mêmes effets avec une étincelle électrique entre deux métaux, quand on augmente la puissance de la décharge : les raies observées à une température inférieure deviennent plus éclatantes, mais d'une manière très-inégale, et il en apparaît successivement de nouvelles qui se distribuent très-irrégulièrement dans toute l'étendue du spectre, de sorte que l'espace a une tendance manifeste à se couvrir entièrement de lumière et à prendre l'aspect du spectre continu que donnent les corps solides incandescents. Ainsi M. Frankland [1] a constaté que la flamme de l'hydrogène, dont la lumière est si faible dans les conditions ordinaires, acquiert une intensité considérable quand ce gaz brûle dans l'oxygène à la pression de 10 atmosphères, et fournit alors un spectre parfaitement continu du rouge au violet. De même, la décharge de la bobine d'induction acquiert un accroissement d'éclat très-marqué quand on la fait passer au travers d'un gaz tel que l'air, l'hydrogène ou l'oxygène à une pression de 2 ou 3 atmosphères. M. Cailletet [2] a constaté aussi que, si l'on produit une étincelle dans un gaz dont on augmente graduellement la pression jusque vers 40 ou 50 atmosphères, les raies prennent bientôt un éclat inattendu, puis s'élargissent, s'estompent, et finissent par se dissoudre dans le champ du spectre, devenu brillant, vivement coloré et continu.

Ajoutons encore, pour terminer, que dans les tubes à gaz très-raréfiés le phénomène présente une nouvelle complication. Le spectre d'un même gaz, comme l'ont montré en particulier les expériences de MM. Plucker et Hittorff [3], peut présenter des apparences très-différentes suivant la partie de l'étincelle que l'on observe, la manière d'exciter la décharge, la pression du gaz et même la forme du tube ; mais ce genre de recherches présente, comme nous l'avons déjà dit, de très-grandes difficultés.

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XVI, p. 103.
(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXIV, p. 1282.
(3) *Proceedings of the royal society*, vol. XIII, p. 155. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. III, p. 505.

NATURE DU GAZ	PRESSION	DÉVIATION DU GALVANOMÈTRE	
		SONDE A L'ÉLECTRODE POSITIVE	SONDE A L'ÉLECTRODE NÉGATIVE
Azote ou air. . .	6^{mm}	70°	18°
	4	40	8
	2	18	3
Hydrogène. . . .	15	90	90
	6	82	65
	4	52	2
	2	35	0

On voit par ce tableau : 1° que, dans les limites des observations, la résistance du gaz en un point quelconque va constamment en diminuant à mesure que la pression elle-même diminue, ce que nous avons déjà vu ; 2° que la conductibilité du gaz est généralement plus grande dans la zone obscure voisine de l'électrode négative que près de l'électrode positive. La différence des conductibilités de ces deux régions est d'autant plus sensible que la pression est plus faible ; dans le cas de l'hydrogène à la pression de 2^{mm}, la déviation du galvanomètre était absolument inappréciable quand la sonde était dans l'espace obscur.

En réalité, la résistance va en croissant d'une manière continue depuis la zone obscure jusqu'à l'électrode positive. Ainsi, en plaçant les sondes à un tiers de distance de l'une des électrodes, dans l'azote à la pression de 2^{mm}, la déviation du galvanomètre a été de 8° ou 12°, suivant que l'électrode la plus voisine des sondes était négative ou positive.

526. Ce maximum de conductibilité dans la zone obscure correspond en même temps à une élévation de température beaucoup moindre. De la Rive a placé dans un tube à gaz de 16 centimètres de longueur et 4 centimètres de diamètre deux thermomètres à mercure situés à une distance d'un centimètre de chacune des électrodes, distance bien suffisante pour les mettre à l'abri de l'influence de ces conducteurs ; les électrodes étaient terminées par des boules métalliques d'un centimètre de diamètre et n'éprouvaient aucun échauffement sensible par le passage des

CHAPITRE XII

EXPÉRIENCES D'ÉLECTRICITÉ ET PROPRIÉTÉS DE L'ÉTINCELLE

PHÉNOMÈNES CALORIFIQUES ET MÉCANIQUES.

546. **Anneaux de Priestley.** — Nous réunirons ici un certain nombre d'expériences qu'il eût été impossible de décrire jusqu'à présent sans interrompre la suite des raisonnements, mais qui rentrent dans les phénomènes étudiés au chapitre précédent. Nous avons vu déjà (432) plusieurs des effets dus à l'échauffement des conducteurs ; décharges disruptives peuvent donner lieu aussi à des phénomènes de même nature. On sait, par exemple, que lorsque la décharge d'une batterie de très-grande surface s'effectue entre deux conducteurs métalliques, l'étincelle a la forme d'un trait de feu entouré par une atmosphère incandescente due à la volatilisation de particules métalliques arrachées aux conducteurs. La surface des conducteurs est d'ailleurs altérée au point où s'est produite l'étincelle et, même à l'œil nu, on y reconnaît facilement des cavités et des gouttes de métal ayant subi la fusion. Priestley (1), ayant observé ce phénomène sur une boule de cuivre poli, remarqua qu'à l'endroit de la décharge il restait une tache circulaire où la surface paraissait avoir été fondue en un grand nombre de points de plus en plus petits à mesure qu'ils étaient plus éloignés du centre. Cette tache était entourée d'un cercle de poussière noire adhérente ; mais la circonstance la plus remarquable fut que cette tache centrale était entourée à une certaine distance d'un cercle

(1) *Histoire de l'électricité*, t. III, p. 525.

régulier de points brillants composés de parties fondues superficiellement. Des taches semblables, avec des cavités plus ou moins profondes et quelquefois de petites gouttelettes et des traits rayonnants, s'observèrent sur des métaux polis différents, que l'on peut ranger dans l'ordre suivant en commençant par ceux où les cavités sont plus profondes : l'*étain*, le *plomb*, le *laiton*, l'*or*, l'*acier*, le *fer* et l'*argent*.

En se servant d'une feuille d'étain, Priestley parvint à obtenir deux et même trois cercles concentriques autour de la tache centrale et il observa que le nombre et le diamètre de ces anneaux augmentent avec la surface de la batterie et la conductibilité du circuit. Il reconnut aussi que les anneaux s'élargissent dans l'air raréfié et se resserrent quand on augmente la pression. Priestley conclut de ces apparences « que la matière électrique sort en forme de cylindres creux et que ces cylindres sont formés par d'autres cylindres plus petits et solides, puisque tous les cercles sont composés de points ronds ». Il semble en effet résulter de là que la décharge a lieu sous forme de nappes concentriques.

547. **Expériences de Fusinieri.** — En même temps que la décharge fond et volatilise des parcelles arrachées aux conducteurs, elle en transporte aussi des fragments d'un conducteur à l'autre ; ce phénomène a été mis en évidence par les expériences de Fusinieri (1). Ce physicien observa que l'étincelle d'une bouteille de Leyde à bouton de cuivre reçue sur une plaque d'argent y laisse une tache jaune qui provient du cuivre. Pour bien démontrer qu'il y a transport de matière, il munit une batterie d'un bouton d'argent et produisit la décharge par un excitateur au travers d'une plaque de cuivre d'un tiers de millimètre d'épaisseur. Les deux faces de la lame de cuivre présentèrent des cavités et des perforations ; la boule de l'excitateur était couverte de taches d'argent et on trouvait des parcelles d'argent engagées dans les cavités de la lame interposée. Ces phénomènes de transport ne se font pas uniquement dans un sens déterminé, car si l'explosion a lieu entre une boule d'or et une boule d'argent, on trouve des traces d'argent sur la boule d'or et des traces d'or sur la boule d'argent.

(1) *Journal de Pavie* 1825, p. 405.

Priestley (1) avait déjà observé des phénomènes analogues. Ayant fait passer la décharge d'une batterie au travers d'une chaîne métallique posée sur une feuille de papier, il vit que le papier était marqué d'une tache noire partout où le métal l'avait touché; mais, en examinant l'expérience de plus près, il reconnut que cette matière ne se produisait qu'aux points de contact des différents chaînons et qu'elle disparaissait quand le circuit ne présentait plus aucune solution de continuité.

Cette projection de matière s'explique aisément sans qu'il soit nécessaire de recourir à aucune hypothèse nouvelle : les particules de l'une des électrodes une fois fondues sont repoussées par ce conducteur et attirées par l'électrode opposée ; on conçoit aisément que ces particules soient lancées d'un conducteur à l'autre ou dispersées dans une direction quelconque. Van Marum a obtenu ainsi par la fusion du fer des globules qui s'élançaient parfois à plus de 30 pieds de distance.

548. **Inflammation de matières combustibles.** — Lorsqu'une étincelle électrique trouve sur son passage une substance combustible, elle peut l'enflammer. Ces phénomènes ont été observés dès l'époque où l'addition d'un conducteur aux machines électriques permit d'obtenir des décharges correspondant à une quantité notable d'électricité. Vers 1744, Ludolf (2) en Allemagne, l'abbé Nollet en France (3), et Watson en Angleterre (4), firent à ce sujet de nombreuses expériences. On alluma, à l'aide d'une étincelle, l'esprit de vin, l'éther et même les fumées qui s'échappent d'une bougie récemment éteinte.

On peut allumer l'éther en tirant une étincelle, avec un conducteur ou même avec le doigt, d'une petite capsule de métal communiquant avec la machine électrique et renfermant une couche mince de ce liquide. Watson rendit encore l'expérience plus frappante en provoquant cette étincelle par l'intermédiaire d'une goutte d'eau épaissie par un mucilage ou même au moyen d'un morceau de glace. Il alluma de même de l'air inflammable, c'est-à-dire de l'hydrogène, et mit le feu à la poudre. Cette der-

(1) *Histoire de l'électricité*, t. III, p. 350.
(2) *Ibid.*, t. I, p. 134.
(3) *Mémoires de l'Académie* (1745), p. 107.
(4) *Phil. trans. abridg.* (1745), vol. IX, p. 151.

nière expérience ne réussit pas sans précautions particulières, car l'étincelle électrique passe habituellement entre les grains sans les enflammer si l'on n'emploie pas une décharge de batterie. Mais une simple bouteille de Leyde suffit si l'on prend le soin, soit de broyer la poudre avec un corps mauvais conducteur et combustible comme le camphre, la colophane, ou quelques gouttes d'une huile inflammable, soit de ralentir la décharge en interposant sur le trajet du circuit une petite couche d'eau ou une corde mouillée (Beccaria).

De même, pour enflammer le coton-poudre, on décharge une batterie avec un excitateur à manches de verre dont l'une des boules est entourée d'une couche de coton poudre dans laquelle on a placé de la poussière de colophane ou de lycopode.

549. **Eudiomètres.** — Cavendish, en 1784 (1), observa que 42,5 volumes d'hydrogène mêlés à 100 volumes d'air brûlent complétement sous l'influence d'une étincelle, et laissent un résidu de 80 volumes, en même temps que la cloche se couvre d'humidité; c'est l'une des premières expériences desquelles on puisse déduire la composition de l'eau et celle de l'air.

On appelait autrefois *eudiomètres* des appareils destinés à éprouver le degré de pureté de l'air en soumettant ce gaz à des réactions chimiques quelconques; on réserve maintenant ce nom d'une manière plus particulière à des tubes dans lesquels on provoque la combinaison des gaz par une étincelle électrique dans les expériences d'analyse.

Il n'entre pas dans notre but de décrire ici ces appareils et la manière de les employer; nous citerons, par exemple, l'eudiomètre de Volta avec lequel on ne peut opérer que sur les gaz peu solubles dans l'eau et où l'étincelle est produite entre une armature métallique et une tige latérale, comme dans le pistolet de Volta; l'eudiomètre à mercure de Gay-Lussac, où l'on provoque l'étincelle entre un bouton mastiqué à la partie supérieure d'une éprouvette en verre et une tige de fer qui, traversant le mercure, remonte dans l'éprouvette jusqu'auprès du bouton supérieur; enfin, l'eudiomètre de Mitcherlich formé par une cloche en verre dans les parois de laquelle on a soudé deux fils de platine, qui

(1) *Phil. trans. abridg.* vol. XV, p. 186.

se terminent dans l'intérieur à une petite distance l'un de l'autre. Cette dernière disposition est la plus avantageuse et celle qui a été généralement adoptée. Il suffit d'ailleurs d'une étincelle très-faible pour enflammer les gaz et celles que fournit un électrophore sont en général bien suffisantes.

550. **Pistolet de Volta.** — On montre souvent l'inflammation de l'hydrogène à l'aide d'un petit appareil appelé le *pistolet de Volta*. Ce pistolet (fig. 200) est formé d'un petit vase métallique A muni d'un goulot qu'on ferme avec un bouchon de liége. Une tige métallique DE pénètre dans ce vase par une tubulure latérale, où elle est isolée au moyen d'un tube de verre, et l'extrémité intérieure E de cette tige s'arrête à une petite distance de la paroi opposée. On remplit le vase d'un mélange d'hydrogène et d'oxygène, ou bien plus simplement on le remplit d'hydrogène en le renversant sur un tube d'où s'échappe ce gaz, puis on y insuffle une certaine quantité d'air. On bouche ensuite le flacon et, le tenant à la main, on présente le bouton extérieur D au conducteur d'une machine. Au moment de la décharge, il se produit deux étincelles, une en D, l'autre en E qui enflamme le gaz et projette le bouchon avec une explosion semblable à celle d'un coup de pistolet. On peut donner à cette expérience les formes les plus variées et les anciens cabinets de physique en renferment souvent de curieux exemples. Dans les machines électriques de Ramsden, les deux montants des coussins sont souvent terminés par un pistolet de Volta.

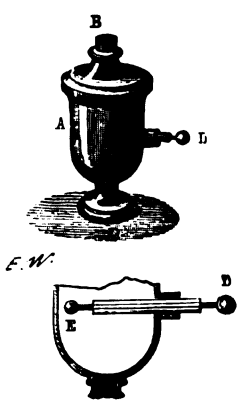


Fig. 200.

551. **Briquet électrique.** — La même propriété a été mise à profit pour construire le *briquet électrique* (fig. 201). Dans cet appareil l'étincelle est obtenue à l'aide d'un petit électrophore formé par un gâteau de résine A ; un plateau métallique attaché à une charnière isolée communique avec le sol par une bande d'étain au moment où il est appliqué sur le gâteau. Le gâteau de résine ayant été fortement électrisé par une peau de chat, on introduit l'électrophore dans une boîte B en bois et on attache le plateau à un fil de soie *f*. Sur la boîte est un double

flacon VV′ renfermant de l'eau acidulée ; un morceau de zinc suspendu dans le flacon inférieur à une certaine hauteur y maintient une atmosphère d'hydrogène qui se reproduit à mesure qu'on la dépense. Ce flacon est muni d'un robinet qui permet au gaz de se dégager entre deux pointes de métal dont l'une *d* communique avec le sol et l'autre avec une tige de métal isolée *ce*. En ouvrant le robinet on soulève, au moyen d'un levier et du fil de soie *f*, le plateau de l'électrophore qui vient alors toucher la partie inférieure de la tige *e* et provoque une étincelle entre les deux pointes de métal au travers du jet de gaz. Ce gaz s'enflamme et allume une bougie placée en face. La boîte inférieure B étant fermée et l'air parfaitement sec, cet appareil peut fonctionner pendant plusieurs mois sans qu'il soit nécessaire d'électriser de nouveau le gâteau.

Fig. 201.

552. **Mortier électrique.** — L'échauffement produit dans les gaz ou les liquides que traverse l'étincelle et la secousse qui en résulte ont été utilisés dans plusieurs expériences. Ainsi le *mortier électrique* est formé d'un petit mortier en ivoire A (fig. 202) traversé par deux tiges métalliques D et E entre lesquelles on peut produire une étincelle, et le mortier est bouché par une bille d'ivoire B ; l'expansion brusque de l'air au moment de la décharge suffit pour lancer la balle à une certaine distance, mais l'effet est beaucoup plus énergique si l'on prend la précaution d'introduire dans le mortier quelques gouttes d'un liquide volatil, comme l'eau ou l'éther.

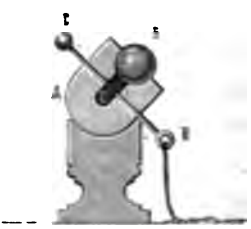


Fig. 202.

553. Si l'on fait passer ainsi une décharge puissante entre deux tiges *a* et *b* (fig. 203), dans l'intérieur d'un tube de verre parfaitement bouché, la secousse peut être suffisante pour fendiller le tube, surtout si le diamètre intérieur est assez étroit. Le

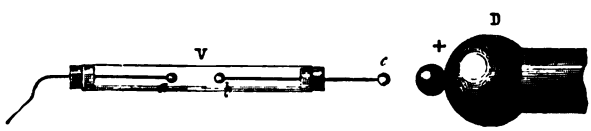


Fig. 205.

tube est presque infailliblement brisé, quelle que soit l'épaisseur des parois, s'il est rempli d'un liquide, parce que l'accroissement de pression devient alors beaucoup plus grand et que la secousse est transmise au tube par un corps peu compressible.

554. **Passage de l'étincelle au travers des corps solides.** — La résistance que présentent les corps solides au passage des décharges électriques n'est pas sans limite. L'abbé Nollet [1] est le premier physicien qui ait fait mention de bouteilles de Leyde percées de petits trous ronds par la décharge électrique qui se produisait spontanément entre les deux armatures.

555. **Perce-carte.** — On répète habituellement cette expérience en faisant passer la décharge d'une bouteille de Leyde entre deux pointes métalliques A et D (fig. 204), plus ou moins éloignées l'une de l'autre et séparées par une feuille de carton. La carte est percée d'un trou qui présente deux particularités remarquables. D'abord les déchirures du papier ne sont pas rejetées seulement d'un côté comme elles le seraient par une piqûre d'épingle, mais elles forment des bavures relevées autour du trou sur les deux faces; il en résulte que la décharge ne marche pas dans un sens déterminé, le papier paraît s'être électrisé par influence et chacune des deux surfaces semble avoir été attirée par la pointe

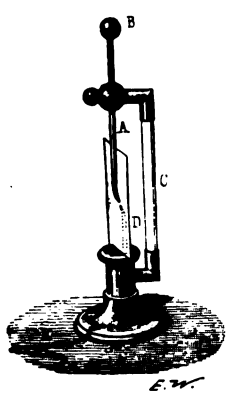


Fig. 204.

[1] *Lettres sur l'électricité*, vol. I. 42

la plus voisine. En outre, le trou est toujours plus rapproché de la pointe négative; Tremery a montré que cette différence est due à l'influence de l'air, car en répétant l'expérience sous une cloche, il a vu le trou se rapprocher de plus en plus du milieu de la distance des pointes, à mesure que la pression du gaz devenait plus faible. Avec une décharge de batterie, Van Marum a fendu un cylindre de buis de 4 pouces de diamètre et $3^p,5$ de hauteur; la surface de séparation des morceaux avait 15 pouces carrés.

556. **Perce-verre.** — L'expérience du *perce-verre* se fait de la même manière. Une lame de verre C (fig. 205), est placée horizontalement sur un tube de verre rodé entre deux pointes métalliques. On fait communiquer la pointe inférieure B avec l'armature extérieure d'une bouteille de Leyde qu'on tient à la main, et on approche le bouton du conducteur A qui porte la pointe supérieure. Pour éviter que l'étincelle n'aille d'une pointe à l'autre en longeant la surface de la lame, il est bon de noyer la pointe supérieure dans une goutte d'huile, et même de mettre une couche de térébenthine de Venise ou d'huile entre la lame de verre et le bord du tube sur lequel elle est posée. Si l'étincelle correspond à une quantité d'électricité assez faible, le verre est percé d'un petit trou ayant l'apparence d'un fil. Si la charge électrique est considérable comme celle que donnerait une batterie, le trou est beaucoup plus large, le verre est broyé sur le passage de l'étincelle et la lame est souvent brisée en morceaux.

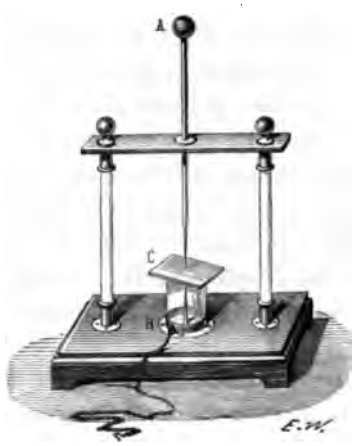


Fig. 205.

557. Il importe de remarquer que, dans les expériences de cette nature, c'est surtout la différence de potentiel qui joue un rôle prédominant et qu'il suffit en général d'une très-petite quantité d'électricité. Ainsi, on pourra percer une lame de verre de quelques millimètres aussi bien et même plus facilement avec

une seule bouteille qu'avec une batterie. Les étincelles directes d'une machine électrique conviennent mieux, parce qu'elles sont plus longues ; les étincelles d'une machine de Holtz munie de ses bouteilles de condensation réussissent mieux encore parce que ces bouteilles sont disposées en cascade : la différence des potentiels est alors très-élevée et la quantité d'électricité assez grande. Il est bien entendu que, dans tous les cas, il faut séparer le perce-verre du conducteur de la machine par une étincelle auxiliaire, pour éviter les fuites continues d'électricité par les pointes.

On voit, d'après cela, que si l'on veut répéter l'expérience du perce-verre d'une manière correcte, en évaluant les charges et les potentiels, il faut employer une cascade de plusieurs bouteilles (fig. 182). On pourra ainsi traverser une lame de verre d'une épaisseur plus grande que la somme des épaisseurs des bouteilles qui constituent la batterie.

558. La plus grande difficulté est d'empêcher que l'étincelle ne contourne la lame de verre au lieu de la traverser. On pourra, par exemple, emplir d'huile d'olive le petit tube sur lequel repose la lame, ou faire affleurer la pointe inférieure au centre d'un disque de verre sur lequel on colle la lame à percer par une couche bien continue de térébenthine.

Pour traverser des épaisseurs de verre de 8 à 10 centimètres, comme on y parvient avec les décharges d'une bobine d'induction, l'expérience doit être préparée avec beaucoup de soin ; voici à peu près la méthode de M. Ruhmkorff. On creuse d'abord à la main deux petits trous opposés sur les deux faces d'un bloc de verre. Dans l'une des cavités on pose une tige de métal terminée en pointe, et de préférence par une pointe d'acier ; on entoure cette tige d'un tube de verre cylindrique, comme un gros verre de lampe, de 6 ou 7 centimètres de diamètre que l'on maintient en place en le scellant avec du plâtre à l'extérieur. On coule ensuite dans ce tube de la résine fondue ou du mastic de fontainier et on prolonge même le tube de verre par un tube de papier rempli de la même matière, de façon que la tige de métal se trouve placée dans l'axe d'un cylindre isolant de 30 à 40 centimètres de hauteur environ. On pose ensuite l'appareil ainsi préparé sur une autre pointe disposée comme la pointe inférieure du perce-verre ordinaire. Enfin, on fait passer la décharge entre

les deux pointes, et il est encore recommandé que la pointe noyée dans la résine forme le pôle négatif.

559. Tous ces préparatifs sont longs, comme on le voit, et l'appareil ne peut servir qu'une fois. MM. Terquem et Trannin [1] ont imaginé une disposition qui permet de réaliser l'expérience plus rapidement et de la reproduire autant qu'on le veut en changeant simplement la lame de verre. La tige supérieure MP (fig. 206) terminée en pointe pénètre dans un trou *o* percé au milieu d'une plaque de verre L; elle est entourée de deux tubes de verre concentriques *tu* et TU posés sur la plaque, et remplis d'un mélange de cire et de résine fondues. Cette substance adhère au verre d'une manière très-énergique. La pointe inférieure P' est encastrée de la même manière dans une seconde plaque de verre L_1, et la tige conductrice P'BN est noyée aussi dans le même mélange de cire et de résine. La lame de verre à percer V, bien desséchée d'abord puis couverte sur ses deux faces d'huile d'olive ou de térébenthine, est placée entre les deux plaques L et L_1. Le tout est posé sur une soucoupe en porcelaine S portée par un pied E à vis calantes. On peut, avec cette disposition, percer des lames de verre de plus de 3 centimètres d'épaisseur.

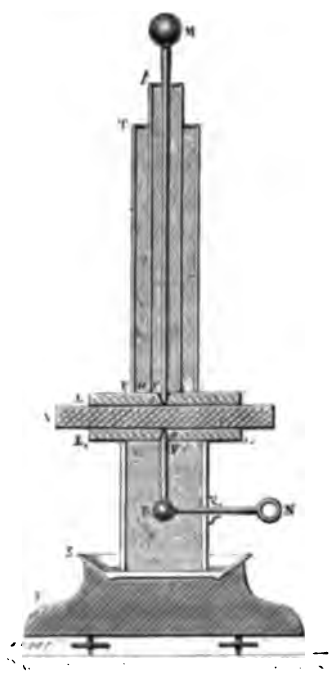


Fig. 206.

560. **Fulgurites.** — Le dégagement de chaleur produit par la décharge électrique dans les corps mauvais conducteurs peut donner lieu aussi à des phénomènes de fusion. Ainsi l'on trouve quelquefois dans les terrains sablonneux recouvrant des couches humides, des tubes vitrifiés, lisses à l'intérieur et recouverts de

[1] *Journal de Physique*, t. IV, p. 120.

grains de sable agglutinés, dont le diamètre intérieur varie de 1 à 50 millimètres et dont la longueur peut atteindre jusqu'à 10 mètres. On attribue ces *tubes fulminaires* ou *fulgurites* au passage de la foudre, car on a pu en observer qui étaient encore chauds et qui s'étaient produits aux points où l'on avait vu tomber la foudre. On peut imiter ce phénomène en faisant passer la décharge d'une batterie au travers d'une couche de verre pilé ou de sable mélangé de sel pour en augmenter la fusibilité. Beudant, Hachette et Savart ont obtenu ainsi, avec la grande batterie du Conservatoire des arts et métiers, des tubes de 30 millimètres de long sur 2 millimètres de diamètre intérieur, qui présentaient quelque analogie avec les fulgurites.

M. Rollmann [1] a réalisé cette expérience d'une manière plus simple en substituant au verre pilé des matières beaucoup plus fusibles, comme de la fleur de soufre. Il fait passer la décharge d'une bouteille de Leyde, ou l'étincelle de la machine de Holtz, au travers de la fleur de soufre renfermée dans un tube ou mieux tassée dans un verre. En renversant ensuite le verre et faisant tomber doucement la poudre, on en retire un tube fondu très-fragile, mais qui a quelquefois 60 millimètres de longueur et 2 millimètres de diamètre intérieur; ces petits tubes sont souvent ramifiés. Si la tige supérieure qui sert d'électrode ne touche pas le soufre, la fulgurite se termine souvent par une sorte d'entonnoir. Enfin, si la décharge est ralentie par une corde humide, on obtient au lieu d'un tube une tige pleine fondue. De semblables effets ont été souvent observés dans les coups de foudre.

561. **Propagation de l'électricité à la surface des corps isolants.** — On a déjà remarqué à propos des figures de Lichtenberg (100 et 118) que, lorsqu'on dépose de l'électricité sur quelques points d'un gâteau de résine, cette électricité se répand, surtout si elle est positive, à une grande distance du point primitif le long de la surface.

De même, dans les machines électriques à plateau, il se produit entre les machoires et les coussins, lorsque la machine est chargée à refus, de longues étincelles circulaires qui lèchent la surface du verre et parcourent ainsi un espace beaucoup plus grand qu'elles

[1] *Pogg. Ann.*, t. CXXXIV, p. 605. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XV, p. 475.

ne pourraient le faire dans l'air. Dans tous les cas analogues, l'électricité ne chemine pas en général, au moins d'une manière complète, au travers du corps mauvais conducteur; elle passe le plus souvent, soit dans la couche de gaz qui est immédiatement en contact avec le plateau, soit par les substances étrangères qui se trouvent sur la surface. On sait d'ailleurs que les corps solides, et le verre en particulier, ont la propriété de condenser les gaz ambiants et surtout l'humidité atmosphérique; cette couche superficielle offre un passage plus facile à l'étincelle.

Ainsi encore, quand une batterie électrique est fortement électrisée, on entend des crépitements dus à des décharges partielles; dans l'obscurité, on aperçoit entre les armatures une multitude d'aigrettes qui courent à la surface des bouteilles ou sur la couche de vernis dont on a recouvert les surfaces non métallisées. Si à ce moment on augmente encore la charge électrique de la batterie, on ne tarde pas à la voir se décharger par une longue étincelle qui éclate d'une armature à l'autre le long de la surface des bouteilles et à une distance beaucoup plus grande que celle qu'on obtiendrait dans l'air.

Cette conductibilité superficielle des corps isolants solides ou liquides donne lieu à un grand nombre de phénomènes curieux que nous indiquerons rapidement. On peut mettre en évidence les traces qu'ont suivies les décharges de deux manières : soit en faisant apparaître avec des poudres convenables l'électricité qui reste encore adhérente à la surface du corps isolant, soit en observant les altérations plus ou moins profondes qu'a subies la surface.

562. **Figures de Lichtenberg.** — Le premier phénomène de cette nature qui ait été observé est connu sous le nom de figures de Lichtenberg; nous en avons profité pour mettre en évidence quelques effets d'influence et démontrer les propriétés de l'électrophore. On peut obtenir ces figures en projetant sur une surface électrisée partiellement, comme un gâteau de résine, une poudre quelconque à l'état neutre, qui s'attachera de préférence à tous les points électrisés. Si la surface porte des taches différentes d'électricités contraires, on pourra y projeter une poudre elle-même électrisée : ainsi la poudre de lycopode, tamisée au travers d'une étoffe de lin, est un peu électrisée positivement,

de sorte qu'elle se réunira en plus grande abondance sur les points chargés d'électricité négative. Le mélange de minium et de soufre, imaginé en 1788 par Villarsy, donne encore des résultats plus complets puisque les deux poudres sont électrisées en sens contraires par leur frottement réciproque, et dessinent séparément les taches des deux espèces d'électricité. Ce mélange constitue ainsi un électroscope extrêmement délicat. Enfin, on peut couvrir d'abord de poussière d'une manière uniforme une surface parfaitement neutre et y produire ensuite les décharges électriques; alors les poussières sont rejetées à une certaine distance et les parties dénudées reproduisent encore des figures analogues aux précédentes.

563. On remarque dans ces figures, par quelque procédé qu'on les ait obtenues, que l'électricité positive s'étend toujours à une plus grande distance que la négative. M. Riess [1] a cherché à comparer ces deux sortes de conductibilités. Il a placé une double plaque de résine entre deux pointes et, mettant l'une de ces pointes en communication avec l'armature extérieure d'une bouteille de Leyde, il provoquait une étincelle entre le bouton de la bouteille et un conducteur communiquant avec l'autre pointe. Avec le mélange des poudres, on obtenait ensuite sous la pointe négative un cercle rouge, et sous la pointe positive une étoile rayonnante jaune. Les rayons positifs s'étendaient toujours plus loin que le cercle négatif; le rapport des rayons des deux surfaces couvertes par les décharges a été sensiblement égal à 2 lorsque l'armature intérieure était négative, et à 3 quand cette armature était positive avec une charge égale.

Ces nombres n'ont pas de signification générale, car les résultats sont très-différents quand on opère avec des potentiels plus faibles. Si le gâteau, par exemple, au lieu de recevoir une véritable décharge en aigrette, est placé pendant assez longtemps à quelque distance d'un corps électrisé, comme une grosse boule reliée à l'armature intérieure d'une bouteille de Leyde, et qu'on y projette ensuite les poussières après avoir enlevé la bouteille, on obtient des taches circulaires bien régulières, quelle que soit l'espèce d'électricité; ce phénomène est dû sans doute aux molé-

[1] *Reibungselektricität*, Bd II, p. 745.

cules de gaz ou aux matières suspendues dans l'air qui s'électrisent sur la boule et sont repoussées de là vers la plaque isolante.

De même, si l'on promène sur la plaque une pointe communiquant avec l'un des pôles positif ou négatif d'une pile sèche, on obtient dans les deux cas des traits déliés qui ne présentent d'autres différences que la couleur des poussières.

Enfin, l'air extérieur joue un rôle dans le phénomène, car Lichtenberg avait remarqué [1] que les taches s'élargissent beaucoup quand on fait l'expérience dans le vide et que l'image négative, tout en restant plus petite, s'entoure aussi de ramifications, de sorte que la différence d'aspect des deux électricités diminue de plus en plus.

Pour rendre compte de ces différences, M. Riess fait remarquer d'abord que toutes les surfaces exposées à l'air sont couvertes de poussières ou au moins de gouttelettes de vapeur condensée, et que presque toutes les poudres s'électrisent négativement par le frottement. Au moment de la décharge, toutes ces substances sont chassées le long de la surface, s'électrisent négativement et offrent ainsi un chemin plus facile à l'électricité positive.

564. **Expériences de M. Wiedemann.** — On obtient des figures plus régulières en saupoudrant d'abord la surface, avant d'y produire les décharges, d'une poussière fine et conductrice comme le lycopode ou le minium. M. Wiedemann [2] a observé par ce moyen quelques faits intéressants, en fixant normalement à la surface une pointe fixe isolée, comme une aiguille à coudre, et lui communiquant l'électricité d'une bouteille de Leyde. Si la plaque appartient à un corps isotrope, c'est-à-dire qui jouisse des mêmes propriétés dans toutes les directions, comme le verre, la gomme laque, la résine et le soufre fondus, ou un corps cristallisé dans le système cubique, les images sont des cercles parfaitement réguliers. Si le corps est anisotrope, c'est-à-dire cristallisé dans un autre système ou présentant une structure fibreuse comme le bois, les taches sont des ellipses, indiquant ainsi un maximum de conductibilité superficielle dans une certaine direction. Pour le gypse en particulier, l'ellipse qui traduit

[1] *De nova methodo*, etc. p. 15.
[2] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXIX, p. 220.

la distribution des conductibilités électriques est très-allongée, car les axes sont dans le rapport de 2 ou 3 à 1.

Ces expériences ne réussissent bien qu'avec l'électricité positive, la négative ne donne que des figures petites et mal définies, et il est difficile de se procurer des échantillons de cristaux assez étendus pour se prêter à ce genre de recherches. M. Wiedemann a opéré sur les cristaux suivants : *gypse*, *azotate de chaux et de cuivre*, *strontiane sulfatée*, *baryte sulfatée*, *aragonite*, *quartz*, *tourmaline*, *apatite*, *spath calcaire*, *borax*, *épidote et feldspath*. Dans tous les cas, l'axe principal de cristallisation a coïncidé avec un des axes de conductibilité électrique, et l'électricité parut se propager plus rapidement dans la direction suivant laquelle la propagation de la lumière est aussi plus rapide.

565. **Expériences de De Senarmont.** — A la même époque, de Senarmont [1] poursuivant l'ordre d'idées qui l'avait conduit à l'étude de la conductibilité de la chaleur dans les cristaux, fit des expériences tout à fait analogues à celles de M. Wiedemann par une méthode un peu différente. Après avoir découpé dans une feuille d'étain un trou circulaire, de Senarmont la colle sur la surface plane d'un corps mauvais conducteur qu'elle enveloppe d'ailleurs complétement, et place au centre du vide circulaire une pointe métallique. Dans les premiers essais, il provoquait une explosion entre la pointe centrale et la circonférence métallique, pour observer ensuite les traces permanentes que l'électricité laisse sur la surface; mais il n'obtint de cette manière que des résultats irréguliers et il utilisa ensuite les lueurs qu'on obtient dans les gaz raréfiés. L'appareil est placé sous une cloche, la feuille d'étain communiquant avec le sol, et l'on fait communiquer la pointe avec le conducteur positif d'une machine de Nairne. Quand la pression est suffisamment faible, la surface bien nettoyée et les bords de la feuille nettement découpés, le flux continu et silencieux d'électricité qui s'échappe par la pointe forme une nappe lumineuse dont le contour est circulaire ou elliptique suivant la nature de la surface. Lorsque la pointe est négative, la lueur électrique paraît se propager avec la même facilité dans toutes les directions, aussi bien sur la surface des

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXVIII, p. 257.

cristaux, quel que soit leur système, que sur celles des corps isotropes; l'électricité positive, au contraire, donne en général des taches elliptiques.

Les expériences réalisées par de Senarmont ont porté sur un plus grand nombre d'échantillons, avec des faces naturelles ou artificielles, et dans des conditions plus variées que celles de M. Wiedemann; elles ont conduit aux conclusions suivantes :

1° Pour les cristaux du système cubique, comme pour les corps amorphes, la conductibilité superficielle est égale en tous sens et sur toutes les faces;

2° Pour les cristaux qui ont un axe de cristallisation, la conductibilité est égale en tous sens sur les faces perpendiculaires à l'axe; sur les faces parallèles à l'axe, il existe une direction de conductibilité maximum qui lui est parallèle ou perpendiculaire; sur les faces inclinées à cet axe, la direction de conductibilité maximum est parallèle ou perpendiculaire à la trace de la section principale;

3° Pour les cristaux des autres systèmes, il existe sur une face quelconque une direction fixe de conductibilité maximum. Quand la face contient dans son plan un ou deux axes de symétrie, cette direction obéit à la même symétrie. Quand la face ne contient pas d'axes de symétrie, la direction de conductibilité maximum ne peut pas être prévue à priori; elle ne coïncide nécessairement ni avec les directions des axes d'élasticité optique, ni avec celles des axes de conductibilité calorifique.

566. **Dessins électriques.** — L'emploi des poudres électrisées permet de reproduire, non-seulement la forme générale, mais aussi les détails des surfaces conductrices par lesquelles on apporte l'électricité sur les corps isolants. Nous avons déjà vu (100) qu'un corps électrisé posé sur une surface isolante y provoque d'abord dans les points les plus voisins une couche électrique de signe contraire avant qu'il se produise une décharge directe. Si l'on pose par exemple un disque conducteur, comme une médaille munie d'un rebord saillant, sur un gâteau de résine et qu'on électrise ce disque positivement, puis qu'après l'avoir enlevé on projette sur la surface un mélange de minium et de soufre, on verra une tache circulaire rouge due à de l'électricité négative développée par influence, entourée d'une circon-

férence jaune d'autant plus nette et moins étoilée que la charge électrique était plus faible.

On peut obtenir ainsi des effets très-variés. M. Riess [1] pose sur un gâteau de résine bien plan un cachet métallique muni d'une pointe dont il approche un corps électrisé positivement, ou qu'il fait communiquer avec le pôle positif d'une pile sèche. Au bout d'un temps plus ou moins long, on enlève le cachet et on projette sur la surface le mélange des deux poudres. Tous les creux du cachet se reproduisent en rouge et les reliefs sont dessinés par des lignes jaunes d'autant plus nettes que la tension de l'électricité était plus faible.

567. **Traces permanentes des étincelles.** — Les étincelles qui cheminent à la surface des corps mauvais conducteurs peuvent y laisser, même après que toute électricité a disparu, des traces permanentes dues, soit à une altération de la surface elle-même, soit à une simple modification des poussières ou de la buée qui y sont adhérentes.

M. Riess [2] fit passer la décharge d'une batterie entre deux pointes séparées par un carreau de verre bien sec; l'étincelle longea la surface du verre sur laquelle elle parcourut d'une pointe à l'autre une distance de 31 lignes (plus de 7 centimètres). Dans ce cas, les traces des étincelles produisaient le cri d'un corps rugueux quand on y frottait une tige et montraient à la loupe l'apparence du verre dépoli. Le verre était primitivement assez isolant pour ne pas décharger un électroscope d'une manière sensible, mais on ramenait rapidement l'électroscope à l'état neutre en le touchant avec le milieu de la lame de verre que l'on tenait à la main par un point où avait passé une étincelle. Le verre était donc devenu beaucoup plus conducteur, ce qui peut s'expliquer simplement par les matières entraînées pendant la décharge. Si l'on projette l'haleine sur la surface du verre, la buée se dépose d'une manière différente sur les traces des étincelles et l'on obtient alors une figure très-délicate montrant des ramifications très-étendues d'abord absolument invisibles. L'altération de la surface est permanente, au moins en partie, car un lavage à l'acide azotique ne fait pas disparaître la conductibilité

(1) *Reibungselektricität*, Bd. II, p. 214.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. LXIX, p. 147.

du verre et n'empêche pas d'une manière complète la réapparition des figures par la buée.

Avec des lames de mica, les traces des étincelles furent des bandes parallèles entre elles, qui paraissaient d'un gris clair par transmission et comme un ruban coloré par réflexion. On y distinguait à la loupe une ligne centrale sombre bordée de franges colorées, indiquant une altération progressivement moins profonde à mesure qu'on s'éloignait du milieu de l'étincelle. Le mica restait d'ailleurs isolant.

568. **Figures roriques.** — Les images que l'on obtient par le souffle sur une surface qui a reçu des décharges sont connus sous le nom de *figures roriques*. Il est facile de démontrer que ces figures ne tiennent pas à la présence de l'électricité, car elles peuvent apparaître longtemps après la décharge et, si on place la surface électrisée au-dessus d'une lampe de manière à la ramener à l'état neutre, les figures continuent encore de se manifester. On peut d'ailleurs les obtenir sur des substances très-différentes, même conductrices, mais leurs formes et leurs dimensions dépendent de la nature de la surface. Sur le verre on a des lignes blanches très-étendues; sur la résine, des sillons noirs divergents sur un fond trouble. Avec les métaux, au contraire, toutes ces ramifications disparaissent et l'on n'a plus que des cercles continus. En général, les surfaces bien propres conviennent mieux parce qu'elles n'ont pas déjà d'altérations irrégulières; cependant les images ne sont pas bonnes avec du mica fraîchement clivé et deviennent plus belles si le mica a été longtemps exposé à l'air. Cette circonstance montre encore l'influence des substances étrangères recueillies ou absorbées par la surface.

569. On peut obtenir par ce moyen des reproductions de gravures ou de médailles tout à fait analogues aux *images de Moser*. On sait, depuis les expériences de Moser, que si deux corps sont en contact ou très-rapprochés, ils impriment leur image l'un sur l'autre; ces images ne sont pas toujours immédiatement visibles, mais on les fait apparaître soit avec la buée de l'haleine, soit avec des vapeurs de mercure. On peut reproduire ce phénomène d'une multitude de manières différentes et avec des corps de toute nature : une pièce de monnaie posée sur une plaque mé-

tallique, un dessin sur une lame de verre, deux gravures l'une en face de l'autre sans se toucher, etc.

Moser avait cru découvrir ainsi une action particulière de la lumière et même des rayons calorifiques, puisque l'expérience réussit aussi bien dans l'obscurité; mais M. Fizeau a démontré qu'aucune espèce de radiation ne peut être invoquée dans l'explication de ces phénomènes. La plupart des corps sur lesquels nous opérons ont leur surface revêtue d'une légère couche de matière organique analogue aux corps gras et volatils, ou au moins susceptibles d'être entraînés par la vapeur d'eau. Ces matières étrangères sont distribuées d'une manière irrégulière suivant les accidents de la surface, dont l'état influe beaucoup sur la condensation des gaz ou de la vapeur. Quand la surface d'un corps est inégale, comme celle d'une médaille, ou formée de parties de natures différentes, comme une gravure sur papier, et qu'on la place dans le voisinage ou au contact d'une autre surface polie et pure, il arrivera qu'une partie de la matière volatile se dégageant sera condensée par la surface polie en plus grande quantité aux points qui sont placés en regard des reliefs de la médaille, et en quantités différentes suivant que les points correspondants de la gravure seront ou non couverts d'encre d'imprimerie. La surface polie aura donc reçu l'empreinte de la médaille ou de la gravure; cette image pourra être visible directement ou par le moyen d'une couche de buée. A l'appui de cette explication, M. Fizeau a constaté que l'interposition d'une lame mince de mica entre les corps formant image et la surface polie rend toujours l'action nulle; que l'échauffement du premier corps accélère la reproduction de l'image; que, si l'on cherche à obtenir successivement d'un corps un grand nombre d'images, son pouvoir s'affaiblit peu à peu; qu'une lame de platine purifiée par l'incandescence et par des lavages à l'acide sulfurique ou l'eau distillée ne produit plus d'images; et enfin que, lorsqu'un corps a perdu cette propriété, on la lui restitue instantanément en promenant les doigts à sa surface.

570. Peu de temps après la découverte de Moser, Karsten [1] réussit à obtenir des images analogues par l'emploi de l'électri-

[1] *Pogg. Annal.*, t. LVIII, p. 115 et t. LX, p. 1.

cité. Il plaça une pièce de monnaie sur une lame de verre reposant elle-même sur une plaque de métal non isolée, puis il fit passer un grand nombre d'étincelles entre la pièce de monnaie et la plaque de métal inférieure le long de la surface du verre. Après avoir enlevé la pièce de monnaie, il suffisait de souffler sur la lame de verre pour y voir apparaître l'empreinte de la pièce avec ses plus petits détails. En employant des lames de verre minces, on peut en superposer un grand nombre les unes sur les autres et l'on obtient sur chacune des figures de la médaille, plus faibles, il est vrai, que dans le cas du contact direct, et qui deviennent de plus en plus confuses. Ces figures ne sont pas dues à des traces d'électricité adhérentes, car la lame de verre longtemps exposée à l'air conserve encore la propriété de les faire apparaître et l'on peut en produire de semblables sur les lames de métal. Dans ce cas seulement, il est nécessaire de séparer la médaille et la plaque par une petite couche d'air ou même par une mince feuille de mica, afin d'obtenir encore un écoulement d'électricité discontinu.

En comparant entre eux les différents phénomènes que nous venons d'indiquer, on voit que l'explication des figures roriques obtenues par Karsten ne présente pas de difficultés. Lorsque deux corps métalliques placés en regard l'un de l'autre, comme les armatures d'un condensateur, sont alternativement électrisés et ramenés au même potentiel un grand nombre de fois, il se produit entre eux des décharges partielles, des oscillations du milieu gazeux interposé, un transport de particules enlevées aux deux surfaces d'une manière inégale en différents points suivant les aspérités qu'ils présentent; si le milieu interposé est un corps solide, comme une ou plusieurs lames de verre, il participe lui-même à ces alternatives par une sorte de polarisation électrique. Il résulte de là que les deux conducteurs et toutes les lames isolantes intermédiaires éprouvent des modifications superficielles correspondantes, et ces modifications, souvent invisibles par tout autre procédé, se révèlent par la manière dont s'y déposent les gouttelettes qui constituent la buée ou celles que donne la condensation des vapeurs de mercure.

EFFETS LUMINEUX DE LA DÉCHARGE.

571. **Auréoles électriques.** — La facilité avec laquelle se produisent les étincelles à la surface des corps isolants donne lieu à un grand nombre d'expériences intéressantes. Lorsqu'on décharge une bouteille de Leyde fortement électrisée, on voit souvent des éclairs qui partent du contour de l'armature extérieure et se répandent sur la surface du verre : les bouteilles de la machine de Holtz, en particulier, s'illuminent ainsi toutes les fois que l'on produit de longues étincelles entre les branches de l'excitateur. On donne quelquefois le nom de *figures magiques* à ces phénomènes dans lesquels les contours des lames conductrices sont dessinés par une nappe de feu. Pour les obtenir avec une grande netteté, on applique sur une lame de verre une feuille d'étain découpée de manière à représenter un objet quelconque (1), comme le profil d'une figure, et l'on met cette feuille en communication avec le pôle positif d'une bobine d'induction, pendant que l'autre pôle communique avec une deuxième feuille d'étain qui recouvre complétement la face opposée du verre. A chacune des décharges de la bobine, la figure est entourée d'une auréole de lumière qui rayonne dans tous les sens; l'auréole est moins étendue avec le pôle négatif.

On peut remplacer la feuille d'étain par un liquide conducteur à l'aide duquel on trace des dessins sur le verre; les figures que l'on a tracées s'entourent alors d'étincelles en forme de branchages ramifiés dans tous les sens.

La même expérience réussit avec une machine électrique ordinaire; seulement il faut alors ménager une interruption sur la communication qui va à la machine, sans quoi l'électricité s'écoulerait d'une manière continue et ne donnerait autour du dessin qu'une bordure lumineuse peu éclatante. L'auréole est d'autant plus belle que l'étincelle auxiliaire est plus longue, c'est-à-dire que les décharges sont moins fréquentes et correspondent à une quantité d'électricité plus grande.

(1) M. Du Moncel, *Notice sur l'appareil de Ruhmkorff*, 3e édition, p. 154.

572. M. Rosetti (1) a donné à cette expérience une forme très-élégante. La lame de verre est encore couverte incomplétement sur l'une des faces d'une feuille d'étain circulaire qui communique avec l'un des pôles de la bobine ; l'autre pôle communique avec une tige terminée par une petite boule ou une pointe, disposée normalement à la lame de verre et amenée à une petite distance de la face non garnie. A chacune des décharges, la surface nue du verre se couvre d'étincelles ramifiées de formes et de couleurs différentes, suivant que le pôle correspondant est positif ou négatif. Ces étincelles s'allongent beaucoup si l'on rend le verre un peu plus conducteur en y projetant avec l'haleine une petite couche de buée, et le phénomène est très-brillant quand on se sert d'une bobine puissante. Si l'on a soin de renverser les pôles de temps en temps par le jeu du commutateur, on voit à chaque inversion les étincelles courir en se dispersant de tous côtés sur le verre; le premier effet des nouvelles décharges est évidemment d'aller neutraliser aux différents points de la lame isolante les traces d'électricité contraire que les décharges précédentes y avaient laissées. Les mêmes expériences peuvent être répétées encore avec une machine de Holtz, au moyen d'une étincelle intermédiaire.

Si l'on examine avec attention les longues étincelles obtenues de cette manière, on voit habituellement que les traits lumineux sont formés de deux ou plusieurs lignes brillantes séparées par des bandes plus sombres, comme si l'étincelle avait la forme de tubes creux de matière incandescente, résultat que nous avons déjà signalé à propos des anneaux de Priestley (543).

573. C'est par un procédé tout à fait analogue que M. Bertin avait obtenu déjà des images de l'étincelle tracées par la décharge elle-même. M. Bertin place entre deux pointes métalliques une lame de verre couverte sur une de ses faces d'une couche de collodion sec sensibilisé, et d'une feuille conductrice sur l'autre face, puis il fait passer entre les pointes une série de décharges comme dans l'expérience du perce-verre. Les étincelles se répandent sur la surface en rayonnant et impressionnent la couche sensible ; on révèle l'image par les procédés ordinaires et on se

(1) *Il Nuovo Cimento*, t. VII-VIII, p. 55. — *Journal de Physique*, t. II, p. 401.

sert ensuite de ce cliché négatif pour en tirer des épreuves positives qui donnent une représentation exacte du phénomène électrique. Ces photographies présentent des variétés de formes nombreuses ; on y remarque en particulier que les étincelles les plus fortes sont généralement formées de traits brillants séparés par une ou plusieurs bandes plus sombres.

574. **Appareils étincelants.** — La faculté que possèdent les surfaces des corps isolants d'augmenter la longueur des étincelles s'explique par l'existence de particules plus ou moins conductrices disséminées sur les surfaces, comme le montre d'ailleurs l'effet d'une couche de buée ou de traces d'humidité. Ces matières étrangères s'électrisent par influence de proche en proche, de sorte que le chemin qui reste à parcourir réellement par l'étincelle est considérablement diminué.

Les appareils étincelants ne sont que l'exagération de ce phénomène. On colle, par exemple, sur un tube de verre une série de morceaux de feuille d'étain découpés en losanges et on les dispose bout à bout à une petite distance l'un de l'autre suivant une ligne héliçoïdale, les morceaux extrêmes communiquant avec des armatures. Quand on tient une des armatures à la main et qu'on approche l'autre d'une machine électrique, on provoque à chacune des décharges une série d'étincelles entre les divers morceaux d'étain, et cet ensemble produit à une certaine distance l'effet d'une étincelle unique.

On obtient ainsi avec les carreaux étincelants des effets très-variés. On colle sur une lame de verre un ruban d'étain très-étroit que l'on replie un grand nombre de fois en lignes parallèles de manière à couvrir toute la surface, et l'on pratique sur ce ruban des solutions de continuité dont l'ensemble figure un objet de forme quelconque, qui apparaît dessiné par une série d'étincelles au moment de la décharge.

Ces parcelles conductrices peuvent être distribuées tout à fait au hasard. On étend, par exemple, sur une lame de verre ou sur une bande de caoutchouc une couche d'eau gommeuse et on y projette de la limaille métallique dont les grains restent attachés après dessiccation ; on colle aux deux extrémités de la lame deux petites bandes d'étain et on fait passer entre elles des décharges électriques. Ces décharges sont formées de traits lumineux dis-

posés en zigzags d'une manière irrégulière avec des ramifications nombreuses, et ressemblent à des étincelles simples considérablement agrandies. Van Marum produisait ainsi des étincelles de 6 pieds de longueur (1m,85) le long d'une planche bronzée.

Dans la bouteille de Leyde étincelante (fig. 207), l'armature extérieure est formée par des fragments de clinquant collés au moyen d'un vernis. L'armature intérieure est munie d'une bande d'étain qui se termine à une petite distance de la couche métallisée. Le fond de la bouteille est relié avec le sol, et le crochet avec une machine électrique. Pendant que l'appareil s'électrise, on voit une multitude d'étincelles à toutes les solutions de continuité, et il se produit au moment de la décharge des éclairs qui, partant de la bande d'étain, se ramifient irrégulièrement sur toute la surface.

Fig. 207.

Les éclairs d'une longueur prodigieuse que l'on observe dans les temps d'orage ne sont dus probablement qu'à une disposition semblable des nuages intermédiaires, et, dans le cas même des étincelles ordinaires, il est probable que les molécules des gaz ou les corps étrangers qu'ils tiennent en suspension interviennent aussi dans le phénomène d'une manière analogue.

575. **Lueurs électriques dans les gaz raréfiés.** — Nous ajouterons encore quelques exemples à ce qui a été dit déjà des décharges lumineuses dans les gaz raréfiés. Hauksbée avait constaté que le simple frottement du mercure dans un tube vide d'air suffit pour y produire des éclats de lumière ; l'astronome Picard en 1676, faisant transporter un baromètre, aperçut une lumière analogue dans la chambre barométrique chaque fois que le mercure était en mouvement. On construit aujourd'hui, pour

répéter cette expérience, des tubes de verre ne renfermant que des traces de gaz très-faibles et dans lesquels on laisse une petite quantité de mercure. Il suffit de faire écouler le mercure d'une extrémité à l'autre en retournant le tube, pour le voir s'illuminer dans toute son étendue, surtout si des obstacles comme des renflements et des contractions du tube forcent le liquide à se subdiviser en gouttelettes. Les tubes dits marteaux d'eau donnent aussi des lueurs quand on les agite dans l'obscurité.

576. L'abbé Nollet (1), voulant faire passer l'électricité dans un vase vide d'air, construisit une sorte de bouteille de Leyde avec un flacon dont le col était muni d'un robinet qui permettait d'y faire le vide, et dont la surface extérieure était couverte sur une petite étendue par une feuille d'étain. Quand on électrise cet appareil à la manière ordinaire, le flacon s'emplit de lumière en forme d'aigrettes ramifiées, par suite de l'électricité qui s'échappe de la garniture du col et vient s'appliquer sur la surface intérieure du verre. L'abbé Nollet remarqua que ce flacon provoquait ensuite une secousse comme une bouteille de Leyde, et que l'intérieur s'illuminait encore au moment de la décharge. Si, dans cette expérience, la garniture du goulot est munie d'une tige terminée en pointe et dirigée vers l'intérieur, on voit cette pointe laisser échapper des aigrettes, ou s'illuminer d'un point brillant, suivant qu'on la charge d'électricité positive ou d'électricité négative.

Fig. 208.

Le gaz raréfié que renferme le flacon se comporte donc comme un conducteur qui remplacerait l'armature intérieure; on peut de même substituer un gaz à l'armature extérieure. Pour cela,

(1) *Recherches sur l'électricité*, p. 425.

un flacon (fig. 208) rempli de feuilles de clinquant est mastiqué dans la tubulure d'une cloche placée sur la platine de la machine pneumatique. Quand on provoque des étincelles entre le crochet de l'armature intérieure et le conducteur d'une machine, après avoir raréfié le gaz de la cloche, on la voit se remplir de jets de lumière qui partent des conducteurs voisins, tels que le tube d'aspiration, et se répandent sur la surface du flacon. Des lueurs analogues apparaissent au moment de la décharge.

Cet appareil est connu sous le nom de *matras de Nollet* et peut donner lieu à l'une des plus belles expériences d'électricité, si l'on fait succéder rapidement les alternatives de charge et de décharge, comme nous le verrons plus loin.

Citons encore une dernière expérience [1]. Une bouteille de Leyde étant électrisée, on enlève le crochet et le bouchon à l'aide d'un bâton de verre, et on la place sous une cloche renversée sur la platine de la machine pneumatique. Après quelques coups de piston, l'électricité s'échappe de l'intérieur sous forme de jets de lumière qui se replient à la sortie du goulot et se jettent sur l'armature extérieure en longeant la surface du verre.

577. **Phénomènes d'influence dans les gaz.** — Toutes les fois qu'un milieu isolant même gazeux est situé entre deux conducteurs maintenus à des potentiels différents, ce milieu s'électrise par influence et l'on y observe tous les effets des décharges, effets qu'on serait quelquefois tenté d'expliquer par le passage direct de l'électricité influente. Si le milieu est gazeux et à une pression très-faible, il peut ainsi s'illuminer comme s'il était traversé par un flux d'électricité continu. Nous avons cité à ce sujet les remarquables expériences d'Hauksbée, qui obtenait des lueurs électriques dans un globe de verre contenant de l'air raréfié, soit en le frottant, soit en le soumettant à la simple influence d'un autre globe électrisé; celles de Canton qui provoquait les mêmes lueurs dans un tube à air raréfié en le déplaçant dans le voisinage d'un conducteur électrisé, etc. Ces lueurs s'observent toutes les fois que survient un changement brusque dans la distance ou l'état électrique des corps en présence; elles traduisent le rétablissement d'un nouvel équilibre.

[1] Sigaud de la Fond, *Précis des phénomènes électriques*, p. 261

Presque tous les appareils à gaz raréfiés, dits *tubes de Geissler*, s'illuminent ainsi quand on les frotte ou qu'on en approche un corps électrisé comme une plaque de caoutchouc. M. Alvergniat (1) a reconnu que certaines vapeurs donnent à cette expérience beaucoup d'éclat; des tubes qui renferment des traces de chlorure ou de bromure de silicium se remplissent, quand on les frotte à la main, de flammes rouges ou verdâtres qui suivent la main ou éclatent dans toute la longueur du tube.

578. Les effets sont plus énergiques si le milieu isolant est placé entre deux conducteurs très-rapprochés l'un de l'autre, comme les armatures d'un condensateur, et l'illumination est continue si l'on fait varier d'une manière permanente l'état électrique des deux conducteurs en les électrisant alternativement en sens contraires. Ces alternatives s'obtiennent naturellement par l'emploi des bobines d'induction. Les deux plateaux d'un condensateur, mis en communication avec les extrémités du fil induit, s'électrisent d'une certaine manière au moment de la décharge directe. Si l'on n'en produit plus de nouvelle, les flux d'électricité positive et négative qui s'étaient précipités vers les plateaux reviennent ensuite se neutraliser dans la bobine, de sorte que le fil est parcouru par deux courants successifs de sens contraires, comme si le courant primitif, ne trouvant pas d'issue entre les plateaux, y éprouvait une véritable réflexion. Mais, si le courant induit direct est suivi au bout d'un petit intervalle de temps par un courant inverse, ce dernier sera de même signe que le reflux de la première décharge et leurs effets s'ajouteront. Quand on laisse se succéder d'une manière continue les décharges directes et inverses, le fil est parcouru par une série de courants d'intensités égales, alternativement de signes contraires. Un galvanomètre sur le fil n'éprouve pas alors de déviation permanente; mais, si l'on y place une soupape électrique, comme l'a fait M. Gaugain, ou deux tubes de Holtz parallèles dont les entonnoirs sont dirigés en sens contraires (M. Daniel), on peut séparer l'un de l'autre, par dérivation sur une partie de leur trajet, les deux systèmes de courants alternatifs.

Il n'est pas même nécessaire d'avoir recours aux bobines

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXIII, p. 1215.

d'induction pour obtenir ces décharges alternantes. On met, par exemple, les deux pôles d'une machine de Holtz en communication séparément avec les deux armatures d'un condensateur, et l'on maintient les boules de l'excitateur à une distance assez faible pour que, de temps en temps, les décharges s'y produisent spontanément. Le premier effet de la machine est de charger le condensateur, puis, lorsque la différence des potentiels est suffisante, le condensateur se décharge par une étincelle entre les boules de l'excitateur. Les fils de communication du condensateur à la machine sont donc parcourus alternativement par des courants d'électricité de sens contraires que l'on peut mettre facilement en évidence avec des tubes à entonnoirs.

579. L'expérience du matras de Nollet répétée avec ces décharges alternatives prend un grand éclat; il s'y produit de véritables étincelles alternantes entre les conducteurs et le flacon, mais

Fig. 209.

on observe les mêmes effets quand ces conducteurs sont séparés tous deux du milieu gazeux par une paroi en verre.

Ainsi M. Gassiot applique deux feuilles d'étain sur les parois d'un tube renfermant un gaz raréfié, comme celui qui sert pour l'expérience de la chute des corps dans le vide [1]. Quand on met ces lames d'étain en communication avec un appareil à décharges alternatives, l'intérieur du tube est rempli de lueurs qui se propagent en tous sens. L'éclat de la lumière dépend d'ailleurs de la quantité d'électricité qui correspond à chacune des décharges et l'emploi de la machine de Holtz est avantageux sous ce rapport, parce qu'il permet, en changeant la distance explosive, de modifier le phénomène à volonté. On construit de même des tubes de Geissler dans lesquels les électrodes aboutissent à des espaces complétement clos par des boules telles que B (fig. 209), qui sont

[1] *Phil. trans.* 1859, part. I, p. 157.

elles-mêmes enveloppées par un tube A rempli aussi d'un gaz raréfié. Dans le tube que représente la figure, il y a trois compartiments séparés par des parois de verre et dans lesquels on peut mettre des gaz différents, qui donnent lieu à des couleurs et à des stratifications très-variées. Seulement les deux électrodes ne présentent plus de caractères distinctifs, parce qu'elles sont alternativement positives et négatives.

580. **Pluie de feu électrique.** — Il n'est pas nécessaire que les gaz soient raréfiés, si la distance des armatures est assez faible. Ainsi M. Du Moncel place à quelques millimètres l'une de l'autre deux feuilles de verre revêtues extérieurement de deux lames métalliques qui les recouvrent incomplétement. En réunissant ces deux armatures avec un appareil à décharges alternatives, on aperçoit comme une belle pluie de feu d'un bleu violacé qui paraît tomber normalement d'une feuille à l'autre; on distingue en outre, entre les armatures de métal et les lames de verre, une nappe lumineuse qui est due à des décharges directes.

M. Grove [1] a profité de cette expérience pour produire des impressions électriques qui présentent une certaine analogie avec les phénomènes observés par Karsten. Entre deux lames de verre parfaitement propres, disposées comme pour l'expérience de la pluie de feu, il plaça un morceau de papier ordinaire imprimé d'un côté. Ayant provoqué les décharges pendant quelques minutes, il enleva le papier, souffla sur la surface du verre qui était en contact avec les caractères imprimés, et les vit apparaître avec une grande netteté; les fibres du papier étaient même très-exactement reproduites par la buée.

Présumant que les vapeurs d'acide fluorhydrique se déposeraient aussi d'une manière inégale sur les différents points, il répéta l'expérience en exposant les lames de verre à l'action de ce gaz et obtint une image inaltérable des caractères imprimés et des rayures du papier, avec moins de perfection il est vrai que par l'emploi du souffle. M. Grove reproduisit de même des empreintes de figures découpées dans une feuille de papier, dont il fit ensuite des épreuves photographiques; il eut des effets tout à fait analogues avec des feuilles métalliques, et remarqua que le verre qui a

[1] *Phil. Mag.* 4e série, t. XIII, p. 65.

acquis la propriété de faire apparaître une figure, sous l'influence de la buée, ne perd pas cette propriété quand on l'essuie ou quand on le lave à l'eau et l'alcool. L'altération qu'ont subie les surfaces est donc entièrement comparable à celle que nous avons signalée à propos des figures de Moser et de Karsten.

M. de Bezold (2) a démontré, par les figures de Lichtenberg, l'alternance des effets électriques qui se produisent dans la pluie de feu. Si l'on n'emploie qu'une seule décharge de la bobine, et une décharge faible, la projection d'un mélange de poudres sur les faces intérieures des lames de verre donne des taches circulaires rouges entourées d'anneaux neutres sur la lame qui touche l'électrode positive, et des étoiles jaunes sur la lame opposée. Avec des décharges plus puissantes, et surtout à la suite de décharges alternantes nombreuses, on trouve sur chacune des surfaces les deux électricités distribuées d'une manière plus ou moins complexe.

581. **Effluves électriques.** — Le passage de l'électricité dans les gaz y produit des phénomènes chimiques nombreux, mais l'énergie et quelquefois la nature même des réactions dépend de la forme des décharges ; c'est ce qui a lieu en particulier pour la transformation de l'oxygène en ozone. Les aigrettes qui s'échappent comme un courant des peignes d'une machine électrique et s'étalent à la surface des plateaux mobiles, les lueurs que l'on obtient dans les gaz raréfiés, et surtout les apparences lumineuses des appareils à décharges alternatives, soit avec des gaz raréfiés comme dans les globes d'Hauksbée (4) ou l'expérience du matras de Nollet (776), soit à la pression ordinaire entre des surfaces très-rapprochées comme dans l'expérience de la pluie de feu électrique (780) ; toutes ces formes de la décharge, qui paraissent caractérisées par une dissémination de l'étincelle et par une faible élévation de température, jouissent de propriétés remarquables ; on les désigne souvent par le nom d'*effluves électriques* qui leur a été donné par Hauksbée. Cette dénomination n'implique pas une hypothèse nouvelle sur la nature des phénomènes, mais elle peut être avantageuse dans le langage pour simplifier la description des expériences.

(2) *Poyg. Annalen*, t. CXL, p. 145. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XXIII, p. 347.

582. Plusieurs physiciens ont imaginé des appareils qui permettent de produire ces effluves en grande abondance et de récolter les gaz qui ont été soumis à leur influence. M. Ruhmkorff dispose dans une caisse en bois (fig. 210) une série de lames de verre parallèles et très-rapprochées. Ces lames sont revêtues d'une feuille d'étain à la surface supérieure et communiquent alternativement avec deux boutons extérieurs que l'on met en relation avec les pôles d'une bobine ou d'un appareil quelconque à décharges alternatives. La pluie de feu qui se manifeste entre toutes les lames agit sur le gaz ambiant, que l'on peut faire circuler dans la boîte par des tubulures adaptées aux deux extrémités. Cet appareil produit de l'ozone en assez grande quantité, mais il n'est pas commode pour faire agir les effluves

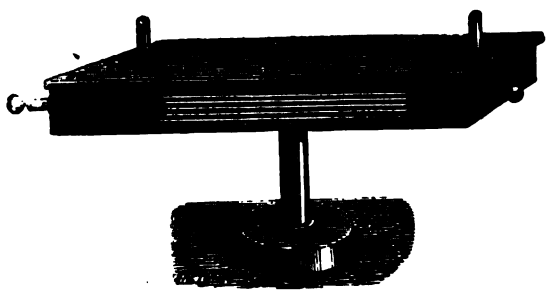


Fig. 210.

électriques sur des gaz quelconques, et analyser exactement les produits de la réaction.

M. W. Siemens a indiqué en 1857 [1] une disposition très-simple. Un tube de verre fermé par un bout est soudé dans l'intérieur d'un autre tube plus large muni de tubulures à ses extrémités, de manière qu'on y puisse faire passer un courant de gaz. Une lame d'étain collée sur la surface intérieure du tube central, et une autre feuille collée sur la surface extérieure du tube enveloppe, sont mises en communication avec les pôles d'une bobine. L'espace annulaire que parcourt le gaz entre les deux tubes est traversé d'une manière continue par des effluves électriques d'autant plus intenses et plus efficaces que le verre est plus mince et les surfaces plus rapprochées.

[1] *Pogg. Annal.*, t. CII, p. 120, note.

Tous les appareils que l'on a employés depuis cette époque peuvent être considérés comme des modifications plus ou moins avantageuses du tube de M. Siemens.

M. Houzeau [1] s'est servi d'un simple tube de verre ouvert aux deux bouts, dans l'axe duquel il introduisait un fil de platine par une soudure latérale; un autre fil, servant de deuxième électrode, était appliqué sur l'extérieur du tube parallèlement au premier, ou enroulé en hélice sur toute la surface. Si les deux fils sont assez écartés à l'extérieur pour que la décharge n'éclate pas entre eux directement, ils s'entourent d'une auréole violacée qui jouit des propriétés de l'effluve.

Dans l'appareil de M. Babo [2], les électrodes sont formées par plusieurs tiges de cuivre soudées dans des tubes de verre et communiquant à l'extérieur par des fils de platine : deux faisceaux de tubes pareils mêlés entre eux sont enveloppés par un tube plus large, dans lequel on fait passer le courant de gaz, et dont les extrémité sont traversées par les fils de platine qui forment la partie extérieure des électrodes. Cette construction est beaucoup plus compliquée que celle de M. Siemens et ne paraît pas donner de meilleurs résultats.

M. Arn. Thenard [3] a remarqué que tous les métaux, sans excepter le platine, s'altèrent rapidement quand ils sont le siége de décharges nombreuses même sous forme d'effluves, et que ces altérations rendent bientôt les appareils inefficaces lorsque le gaz sur lequel on veut agir est en contact avec les électrodes métalliques; il a donc repris le tube de M. Siemens, où l'effluve a lieu entre deux surfaces de verre, et remplacé les armatures d'étain par un liquide conducteur, afin d'obtenir une nappe lumineuse plus homogène.

L'appareil de M. Thénard (fig. 211) se compose de trois tubes de verre concentriques convenablement soudés entre eux et déterminant ainsi trois cavités différentes. Le tube central est fermé par un bout et renferme un liquide conducteur servant de première électrode A; l'espace annulaire extérieur renferme aussi un liquide conducteur qui est la deuxième électrode B; la cavité

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XXII, p. 153.
[2] *Annal. der Chemie und Pharm.*, Suppl. II, p. 265.
[3] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXV, p. 118.

intermédiaire est traversée par les effluves et l'on y fait passer un courant de gaz à l'aide de tubulures C et D aux extrémités. Quand on emploie le mercure comme électrodes, on obtient d'abord de bons effets; mais, au bout de quelque temps, le verre se dépolit au contact du mercure, il s'y produit des aspérités qui transforment l'effluve en une multitude de petites étincelles, et les réactions qu'éprouve le gaz peuvent être complétement modifiées. En substituant au mercure des liquides acides, du chlorure d'antimoine ou simplement de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, toutes ces poussières arrachées au verre se dissolvent dans le liquide; la surface du tube, étant toujours mouillée, reste polie malgré

Fig. 211.

les altérations qu'elle subit lentement, de sorte que l'effluve conserve longtemps, sinon indéfiniment, son apparence et ses propriétés primitives.

MOUVEMENTS ÉLECTRIQUES.

583. **Pantins, carillon et grêle électriques.** — On a mis à profit les actions électriques pour construire des appareils très-variés dont le mouvement est entretenu par une suite d'attractions et de répulsions. L'une des plus anciennes expériences de ce genre est celle des *pantins électriques* : ce sont des figurines construites en moelle de sureau dont la tête est munie d'une petite houppe de fils de soie. On place ces figures entre deux plateaux métalliques horizontaux dont le supérieur communique avec

une machine électrique et l'inférieur avec le sol ; le pantin est attiré d'abord par le plateau supérieur puis repoussé aussitôt qu'il l'a touché, et saute de l'un à l'autre, tant que la machine est en mouvement. Les houppes jouent un rôle dans le phénomène, et l'on peut maintenir un de ces pantins suspendu et immobile entre les deux plateaux, comme nous l'avons déjà vu pour le poisson de Franklin (116).

Un corps léger quelconque, placé entre deux conducteurs électrisés, peut osciller de l'un à l'autre, en les touchant alternativement, aussi longtemps qu'il existera entre ces deux conducteurs une différence de potentiels suffisante. Telle est, par exemple, l'expérience du *carillon électrique* (fig. 212). Deux timbres T et T'

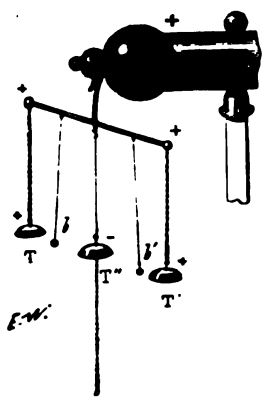


Fig. 212.

Fig. 213.

sont suspendus par des chaînes à une tringle métallique qui communique avec une machine électrique ; un timbre intermédiaire T'' attaché au même support par un fil de soie communique avec le sol ; enfin deux boules de métal *b* et *b'* sont suspendues par des cordons de soie dans l'intervalle. Le timbre T'' se charge par influence d'électricité contraire à celle de la machine, et les boules oscillent des timbres extrêmes au timbre du milieu en produisant une suite de chocs qui les font résonner.

De même, on place de petites balles de moelle de sureau sur un plateau métallique qu'on recouvre d'une cloche. Un conducteur terminé par une sphère ou un plateau (fig. 213) traverse la tubulure de la cloche et communique avec une machine électrique ;

les balles sont attirées vers le conducteur électrisé, puis retombent et produisent un petit bruit qui rappelle la chute de la grêle. Cette expérience, qui porte le nom de *grêle électrique*, a une certaine célébrité parce que Volta a expliqué la suspension des grêlons dans l'air par des mouvements analogues entre deux nuages électrisés. On peut la répéter d'une manière plus simple en électrisant l'intérieur d'une cloche en verre, soit par un conducteur de même forme, comme pour la bouteille de Leyde à armatures mobiles (131), soit mieux à l'aide d'une pointe métallique ; on renverse ensuite cette cloche au-dessus des balles qui prennent aussitôt les mêmes mouvements. Dans ce cas, on accélère les oscillations en approchant de la cloche la main ou un large conducteur non isolé.

Des expériences analogues se réalisent encore plus facilement

Fig. 214.

Fig. 215.

à l'aide des bouteilles de Leyde. Ainsi on obtiendra un carillon électrique à l'aide d'une petite boule de métal B (fig. 214) suspendue par un fil de soie entre deux timbres A et C dont l'un communique avec l'armature extérieure et l'autre avec l'armature intérieure d'une bouteille de Leyde. Les oscillations durent plus longtemps si la balle mobile est formée d'un corps très-léger comme du liége ou de la moelle de sureau. Franklin employait pour cela un morceau de liége noirci à la lampe auquel il attachait plusieurs bouts de fil pour figurer grossièrement une énorme araignée (fig. 215).

584. **Roues électriques.** — Franklin, en 1748, a même construit une *roue électrique* qui prenait ainsi un mouvement de rotation continu. Un disque de bois horizontal mobile autour d'un axe vertical était muni de 30 rayons en verre terminés par des dés en métal. Deux bouteilles de Leyde chargées d'électricités contraires étaient placées aux extrémités d'un même diamètre, de façon que les dés isolés pussent toucher alternativement les armatures intérieures ou du moins y provoquer des étincelles; il suffisait d'imprimer un petit mouvement de rotation à l'appareil pour le voir s'accélérer et se maintenir jusqu'à ce que les deux bouteilles fussent sensiblement déchargées.

Un autre appareil de Franklin était formé de 12 piliers en verre disposés sur une même circonférence et terminés par des dés métalliques. Le disque mobile était en verre et muni de feuilles d'or sur ses deux faces de manière à constituer un condensateur; les deux armatures communiquaient séparément avec deux boules qui pouvaient, par suite de la rotation, provoquer successivement des étincelles avec tous les dés isolés. Cet appareil, une fois chargé, pouvait marcher pendant une heure à raison de 10 tours à la minute en moyenne, ce qui faisait 600 tours ou 7200 étincelles pour chaque boule, c'est-à-dire en tout plus de 14000 étincelles.

Le tourniquet de M. Ruhmkorff (115) fonctionne d'une manière analogue par le jeu des pointes, et nous en verrons d'autres exemples à propos des machines de Holtz.

On trouve dans certains cabinets de physique un appareil qui rappelle la roue de Franklin. Une série de tubes étincelants terminés par des boules de métal sont disposés verticalement sur une même circonférence. Entre ces tubes est un tourniquet formé d'une seule branche à deux pointes lesquelles, par suite de la rotation, passent à petite distance de toutes les boules des tubes étincelants. On met le tourniquet en communication avec une machine et la base de tous les tubes avec le sol. Le tourniquet se met à tourner rapidement et, si la première communication est interrompue en un point pour provoquer une étincelle auxiliaire, les décharges qui se produisent sur les différentes colonnes les illuminent tour à tour.

585. L'électroscope à décharges de M. Gaugain (317), mis en

communication par l'intermédiaire d'un fil médiocrement conducteur avec une bouteille de Leyde ou une batterie électrique, produirait de même un très-grand nombre d'oscillations de la feuille d'or, et l'expérience pourrait être disposée de manière à durer pendant un temps extrêmement long ; mais, pour obtenir des effets presque indéfinis, on a recours aux piles électriques et particulièrement aux piles sèches, que l'on fait agir sur des appareils très légers, susceptibles de prendre un mouvement de balancier ou de rotation ; nous avons cité le tourniquet de Delezenne qui a marché pendant 28 ans sans interruption.

EFFETS PHYSIOLOGIQUES.

586. **Décharges des batteries.** — Les secousses électriques que l'on provoque dans le corps de l'homme et des animaux, en les mettant sur le trajet de la décharge d'un corps électrisé, est un des phénomènes qui ont le plus frappé l'attention, surtout à l'époque de la découverte de la bouteille de Leyde. On a communiqué ces secousses à plusieurs personnes se tenant par la main et formant une chaîne entre les deux armatures d'une bouteille ; Franklin a ainsi terrassé avec la décharge de 2 grandes jarres 6 hommes disposés en chaîne, chacun posant la main sur la tête du suivant ; l'abbé Nollet a communiqué la secousse électrique à 300 gardes, etc. Il est à remarquer, dans ces expériences, que les personnes placées aux extrémités de la chaîne éprouvent une commotion beaucoup plus vive que celles du milieu, ce qui tient sans doute au défaut d'isolement. On parvient aisément à tuer des oiseaux par une bouteille de Leyde ; mais la décharge des batteries pourrait être très-dangereuse pour l'homme et les plus grands animaux. L'idée d'appliquer ces secousses électriques au traitement de certaines affections, des paralysies en particulier, se présenta à l'esprit de tous les électriciens, et l'on cite dans la science un grand nombre de guérisons opérées, soit par les machines ordinaires, soit par les bobines ou même l'action des courants continus. L'électricité tend à devenir un des agents médicaux les plus employés.

L'énergie de la secousse provoquée dans un être vivant aug-

mente avec la différence de potentiel des deux conducteurs que l'on met en relation, et surtout avec la quantité d'électricité. Ainsi on peut recevoir impunément des étincelles de 20 ou 30 centimètres fournies par une machine ordinaire à plateau ou même par une bobine d'induction, tandis que la décharge d'une batterie capable de donner seulement des étincelles de quelques millimètres, peut être foudroyante. De même, à masse électrique égale, la décharge d'une cascade donne une secousse plus violente que celle d'une bouteille unique. Il semble donc résulter de ces indications générales que la secousse physiologique varie dans le même sens que l'énergie électrique de la décharge. Une autre circonstance cependant joue encore un rôle très-important, c'est la durée du phénomène ; la secousse est très-faible quand on décharge une batterie par l'intermédiaire d'une corde mouillée; elle peut être encore supportable quand on touche avec les mains bien sèches les deux armatures de la même batterie, et elle devient sensiblement plus énergique si l'on a soin de mouiller les mains pour les rendre plus conductrices.

587. **Action des courants continus.** — Les décharges de batteries dans ces conditions provoquent des secousses trop violentes pour qu'il soit possible d'en déterminer la loi; on ne peut arriver à des effets réguliers qu'en modérant beaucoup l'excitation électrique. Nous indiquerons rapidement les principaux résultats obtenus dans cet ordre de recherches.

Supposons d'abord que l'on applique les deux pôles d'une pile électrique très-faible en deux points d'un nerf moteur, comme le nerf sciatique d'une grenouille, de manière à y faire passer un courant; on observe que le muscle correspondant se contracte au moment où le circuit de la pile est ouvert ou fermé, et reste à peu près insensible quand le courant passe d'une manière continue, de sorte que les variations de l'état électrique sont seules capables de provoquer la contraction musculaire. Il se manifeste dans ces effets physiologiques des différences assez grandes. Ainsi, si le courant est ascendant, c'est-à-dire parcourt le nerf de la périphérie vers le centre, et d'intensité croissante, la secousse qui correspond à la fermeture du circuit est d'abord plus énergique que celle de l'ouverture, puis les deux secousses deviennent égales et enfin, pour des intensités suffisantes, la se-

cousse d'ouverture est prédominante ; l'inverse a lieu si le courant dans le nerf est descendant.

Si l'on fait agir sur le nerf un courant continu suffisamment intense, le muscle éprouve une contraction permanente ou tétanos. Cet effet peut être attribué, soit aux variations inévitables du courant électrique, soit plutôt aux actions chimiques qui produisent des composés nouveaux, lesquels détruisent peu à peu les différentes fibrilles du nerf et provoquent le tétanos, comme le ferait l'action directe d'un acide, d'une base ou d'un sel.

Les nerfs sensibles sont en général plus excitables par les courants électriques ; mais les phénomènes physiologiques auxquels ils donnent lieu suivent à peu près les mêmes lois.

Au lieu d'exciter le nerf, on peut exciter le muscle lui-même et l'on obtient des effets analogues, quoique généralement moins énergiques.

588. **Influence de l'électrotonus.** — Un courant continu assez faible, qui traverse une portion d'un nerf moteur, ne provoque pas de contraction permanente dans le muscle correspondant, mais le passage du courant met le nerf dans un état particulier, dit *électrotonus*, qui en modifie beaucoup l'excitabilité. Les parties de ce nerf les plus rapprochées du pôle négatif sont plus excitables par un nouveau courant qu'elles ne l'étaient dans l'état primitif ; les parties voisines du pôle positif sont au contraire moins sensibles et il se trouve nécessairement, entre les deux pôles, un point dont l'excitabilité n'a pas été modifiée. Ce point neutre n'est pas situé à égale distance des deux pôles : il est toujours plus près du pôle négatif et s'en rapproche d'autant plus que le courant permanent est lui-même plus intense. Les effets de l'électrotonus persistent encore quelque temps après qu'on a supprimé le courant qui l'avait produit. Ces modifications inégales de l'excitabilité du nerf pendant l'électrotonus interviennent sans doute pour une grande part dans les différences des contractions musculaires, suivant que le courant excitateur est établi ou supprimé, suivant qu'il marche dans un sens ou en sens contraire.

589. **Transmission de la contraction et de l'excitation.** — La contraction musculaire et le transport de l'excitation du nerf au muscle sont des effets mécaniques, en relation directe avec la

structure de ces organes, et ne peuvent se produire instantanément. En effet, un courant d'une durée trop courte ne provoque pas de contraction. D'autre part, quand on excite un muscle directement, il s'écoule un temps appréciable (*excitation latente*) entre l'établissement du courant, par exemple, et le début de la contraction ; celle-ci va en croissant d'abord, puis en diminuant et finit par disparaître, mais d'une manière plus lente, après quelques oscillations dues à l'élasticité des tissus. Si l'on excite un muscle d'une certaine longueur, la contraction qui se manifeste d'abord au point excité se communique ensuite de proche en proche aux parties voisines avec une vitesse assez faible, puisqu'elle ne dépasse guère 1 mètre par seconde.

De même, quand on excite deux points d'un nerf moteur, le muscle n'entre en contraction qu'au bout d'un certain temps et se relâche ensuite; la période d'excitation latente est d'autant plus grande que les points du nerf attaqués sont plus éloignés du muscle, de sorte qu'en faisant deux expériences différentes sur le même organe que l'on excite en deux points inégalement éloignés du muscle, et déterminant la différence des temps qui s'écoulent entre l'établissement du courant et le début de la contraction musculaire, on peut évaluer la vitesse avec laquelle l'excitation se transmet dans le nerf. M. Helmholtz a trouvé ainsi $26^m,4$ pour les nerfs de la grenouille et 32 mètres environ chez l'homme ; ces résultats sont intéressants à signaler à notre point de vue, parce qu'ils sont tout à fait de même ordre que la propagation des effets électriques dans les corps médiocrement conducteurs, comme des cordes mouillées.

590. **Effets des courants d'induction.** — Les piles électriques sont le procédé le plus commode pour produire les excitations physiologiques, parce qu'on peut modifier à volonté la durée du courant, soit par un poids qui tombe d'une certaine hauteur et ferme le circuit pendant une portion de sa chute, soit par des interrupteurs à bascule ou à rotation, et faire varier l'intensité en introduisant des résistances dans le circuit ou en changeant le nombre des éléments de la pile. Toutefois, la détermination de l'intensité du courant, même en valeurs absolues, ne suffit pas pour définir le phénomène électrique qui provoque les contractions. Ainsi, quand on ferme le circuit d'une pile, il se produit

une chute d'électricité tout à fait analogue à la décharge d'une batterie ; la force vive correspondante et la durée du phénomène dépendent du nombre des éléments de la pile, de leurs dimensions, de la conductibilité des différentes parties du circuit, et toutes ces circonstances devraient entrer en ligne de compte si l'on voulait préciser exactement les conditions de l'expérience. L'emploi des condensateurs permettrait de définir d'une manière très-simple l'énergie des décharges, mais, pour produire des secousses de faible durée, on a eu le plus souvent recours aux appareils d'induction.

Si l'on fait passer la décharge d'une bobine entre deux points d'un nerf moteur, on constate que le courant induit direct, dû à l'ouverture du courant inducteur, produit des contractions plus énergiques que le courant inverse, ce qui était à prévoir d'après la plus courte durée du premier. Une succession lente de courants induits de sens inverses provoque une succession de secousses physiologiques ; mais, si les courants induits se succèdent trop rapidement, le muscle n'a pas le temps de se relâcher après chaque secousse et prend une contraction tétanique. Une étude plus attentive de ce phénomène permet de montrer alors que le muscle contracté n'est pas immobile, et qu'il éprouve une sorte de vibration dont les oscillations sont isochrones avec les décharges de la bobine d'induction. Masson a reconnu que le tétanos ne se produit plus si les décharges alternantes sont plus rapides encore ; cette suppression des secousses peut être due en partie à ce que les décharges empiètent alors les unes sur les autres, et que les contractions relatives à chacune d'elles n'ont plus le temps de s'exercer.

Quand une bobine d'induction, dépourvue de noyau magnétique, produit des décharges alternatives assez rapides pour provoquer le tétanos d'un muscle, il suffit quelquefois d'introduire un paquet de fils de fer dans la bobine pour faire disparaître l'état tétanique ; cependant les décharges sont alors plus énergiques, mais l'aimantation a pour effet d'en augmenter la durée et, par suite, de faciliter l'empiétement des courants successifs.

591. **Excitation unipolaire.** — M. Chauveau [1] a employé

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXI et LXXXIII.

Tout récemment un mode d'excitation qu'il appelle *unipolaire* et qu'il croit plus propre à simplifier l'étude des phénomènes. L'une des électrodes étant appliquée en un point d'un nerf, l'autre électrode est mise en relation avec le nerf symétrique, de manière qu'on puisse apprécier immédiatement la différence des effets, ou bien communique avec le corps du sujet par une surface très-considérable, comme le liquide d'un bain dans lequel l'animal est plongé en partie. Dans ces conditions, les résultats sont très-différents suivant la nature de l'électricité.

Si l'on fait agir un courant continu d'intensité croissante sur un nerf moteur, par exemple, on constate qu'à l'établissement du courant la secousse est d'abord plus forte pour le pôle négatif, puis que les deux secousses sont égales pour une certaine intensité, à partir de laquelle les secousses positives deviennent prédominantes. Quand on étudie la manière dont varie l'énergie des secousses suivant l'intensité du courant, en ayant soin de se mettre à l'abri de diverses causes d'erreur, telles que la fatigue et l'altération des nerfs, on voit que les contractions positives augmentent d'abord proportionnellement à l'intensité et moins rapidement ensuite, tout en restant continuellement croissantes; les contractions négatives, au contraire, qui sont d'abord plus grandes, augmentent lentement et passent quelquefois par un maximum pour aller ensuite en diminuant.

Le sens du phénomène est renversé quand on agit sur un nerf sensitif : les excitations positives paraissent d'abord plus grandes et deviennent ensuite plus faibles que les négatives; avec un courant suffisamment intense, la douleur causée par l'électricité négative est incomparablement plus vive. On peut rapprocher encore ces résultats de la variation de l'excitabilité pendant l'électrotonus (788) et de cette autre propriété, constatée dans les décharges électriques, que le dégagement de chaleur est généralement plus grand à l'électrode négative, comme on le vérifie aisément dans les tubes à gaz raréfiés.

A l'ouverture du circuit de la pile, la contraction musculaire augmente d'abord avec l'intensité du courant pour diminuer ensuite et même disparaître, et l'électrode négative se montre toujours moins efficace.

Avec les courants d'induction ou les décharges des condensa-

teurs, la marche générale des secousses est à peu près la même, mais avec moins de netteté. Les contractions négatives sont d'abord plus énergiques; puis, à mesure qu'on fait croître l'intensité du courant inducteur, les secousses des deux électrodes ne tardent pas à devenir égales et conservent ensuite cette égalité, quelquefois avec une légère tendance à l'inversion. D'autre part, la contraction atteint rapidement une valeur maximum, à partir de laquelle elle paraît indépendante de l'intensité du courant inducteur; toutefois le relâchement du muscle, qui est très-rapide à la suite des décharges faibles, devient de plus en plus lent à mesure que l'intensité du courant inducteur va en augmentant.

Cette question des secousses provoquées par l'électricité a donné lieu à un grand nombre de travaux que nous n'avons pas pu passer en revue, même d'une manière rapide; mais il semble qu'on n'a pas assez défini en général le phénomène électrique lui-même, en particulier son énergie et sa durée, et que la considération de ces deux éléments serait plutôt de nature à conduire à des lois simples au point de vue de la physiologie.

EFFETS CHIMIQUES DES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES.

592. **Inflammation de mélanges détonants.** — Dans la plupart des combinaisons qui s'effectuent sous l'influence des décharges, l'électricité n'intervient que comme un moyen commode de provoquer en certains points une grande élévation de température. Cavendish, en 1784, a utilisé la propriété que possède l'étincelle électrique d'enflammer un mélange d'hydrogène et d'oxygène ou d'air. L'étincelle agit comme un corps incandescent que l'on introduirait dans le mélange; elle enflamme la couche de gaz qui l'environne; la chaleur produite par la combinaison de cette première masse élève alors la température des couches voisines au point de les enflammer à leur tour, et la combustion se propage ainsi de proche en proche avec une vitesse plus ou moins grande. Cette vitesse dépend de la quantité de chaleur dégagée, de la température de la combinaison, de la conductibilité calorifique des gaz, de la pression et de

la masse à échauffer. On peut ainsi ralentir la vitesse de propagation, jusqu'à la rendre nulle, en ajoutant au mélange explosif une proportion de plus en plus grande d'un autre gaz qui n'intervient pas dans la combinaison. La chaleur dégagée par la combustion autour de l'étincelle est employée en partie à échauffer le gaz inerte, et il peut arriver que la température acquise par le mélange soit inférieure à celle qui est nécessaire pour provoquer la combinaison des couches suivantes. Dans ce cas, pour effectuer l'opération d'une manière complète, il serait nécessaire d'entretenir les étincelles d'une manière continue pendant un temps assez long, afin que toutes les parties du mélange vinssent s'y combiner tour à tour.

Ainsi Humboldt et Gay-Lussac [1] ont reconnu que, dans les mélanges d'hydrogène et d'oxygène où ce dernier gaz est en excès, il n'y a plus d'inflammation lorsque le mélange détonant forme une fraction moindre que les $\frac{3}{17}$ du volume total, et que la combinaison est incomplète tant que le volume de l'oxygène est plus que 9 fois celui de l'hydrogène. Si l'hydrogène est dominant, au contraire, il en faut une proportion beaucoup plus grande pour rendre le mélange incombustible. L'azote se comporte à peu près comme un excès d'oxygène. Dalton [2] a trouvé que des mélanges de 10 volumes d'hydrogène avec 4 volumes d'air, ou de 15 volumes d'air avec 1 d'hydrogène, ne s'enflamment plus par l'étincelle, et que la combinaison n'est pas complète si le volume de l'hydrogène dépasse le double de celui de l'air, ou s'il n'en atteint pas le cinquième. L'acide carbonique empêche la combustion d'une manière encore plus efficace.

Les limites d'explosibilité varient d'ailleurs avec les diamètres des tubes eudiométriques et l'énergie des étincelles. On conçoit, en effet, que si la masse de gaz dans laquelle débute la combinaison occupe un espace très-restreint, la chaleur dégagée en ce point pourra être insuffisante pour échauffer la couche voisine, à laquelle elle se communique, jusqu'à la température de combinaison; tandis qu'avec une forte étincelle, le rapport de la masse échauffée à celle qui se combine sera beaucoup plus petit et la température plus élevée.

[1] *Annales de Chimie*, 1re série, t. LIII, p. 259, 1805.
[2] Thomson, *Annals of philosophy*, nouvelle série, t. X, p. 204 (1825).

Par la même raison, la pression doit exercer aussi une influence sur le phénomène. Ainsi Grotthus (1) a trouvé qu'un mélange de chlore et d'hydrogène ne détone plus quand il est réduit par la raréfaction au sixième de la pression atmosphérique, et il faut réduire cette pression au seizième pour empêcher la combustion d'un mélange d'hydrogène et d'oxygène. De même, un mélange d'air humide et d'hydrogène chauffé avec une lampe jusqu'à ce que le volume fût quadruplé, ne put être enflammé par une étincelle ni par la flamme d'une bougie; cela tenait sans doute à la présence d'une grande quantité de vapeur d'eau dans le mélange.

593. **Papillons électriques.** — Si le mélange est amené à la limite d'explosion, soit par une diminution convenable de la pression, soit par l'introduction d'un gaz étranger, l'inflammation peut encore se propager, mais d'une manière incomplète et dans des directions irrégulières. MM. Demondésir et Schlœsing ont montré ce phénomène par une belle expérience. Un grand ballon en verre de 10 litres au moins de capacité est fermé par un bouchon percé de deux trous; l'un de ces trous est traversé par un tube de verre qui s'ouvre au milieu du ballon et qui amène un courant rapide d'un mélange d'air et d'hydrogène; ce courant s'échappe par l'autre orifice. On obtient le courant gazeux qui convient en faisant arriver l'air à l'aide d'une soufflerie en relation avec un petit gazomètre à eau, pour que la pression soit à peu près constante, et l'on fait déboucher obliquement dans le canal de dégagement un tube à robinet qui communique avec un appareil producteur d'hydrogène; on règle par tâtonnements l'ouverture de ce robinet d'après la manière dont marche l'expérience. En face de l'orifice du tube, dans le centre du ballon, on produit entre deux fils de platine une série d'étincelles à l'aide d'une bobine, ou bien on fait brûler d'une manière continue un tout petit bec de gaz. Si la proportion d'hydrogène est trop faible, le mélange ne s'enflamme pas. Quand on augmente peu à peu l'hydrogène, on voit d'abord les étincelles ou la flamme s'élargir et s'entourer d'une espèce d'auréole : la combinaison a déjà lieu, mais elle est limitée. Bientôt des espèces d'éclairs ou des langues

(1) *Annales de Chimie*, 1re série, t. LXXXII, p. 54.

de feu se disséminent dans toute l'étendue du ballon d'une manière irrégulière, qui rappelle le vol d'un papillon ou les mouvements d'un essaim de mouches, et le même phénomène persiste indéfiniment tant qu'on maintient le courant gazeux. L'expérience ne présente aucun danger d'explosion violente quand on commence par provoquer l'étincelle avant l'introduction d'hydrogène dans le courant d'air ; si, par instants, la proportion d'hydrogène devient trop grande, l'inflammation se propage le long du tube jusqu'au point où débouche ce gaz ; il suffit alors de fermer un peu le robinet pour ramener la combustion dans le ballon et rétablir les choses dans l'état primitif.

On peut déterminer au moins une limite inférieure de la vitesse de propagation dans un mélange explosif, comme le faisait M. H. Saint-Claire Deville [1], en enflammant ce mélange à la sortie d'un chalumeau, et en diminuant peu à peu la pression jusqu'à ce qu'une explosion se produise dans les tubes de caoutchouc qui amènent les gaz ; à ce moment même on évalue le débit. Le refroidissement causé par les parois des tubes, dans cette expérience, contribue à ralentir l'inflammation ; la propagation doit être notablement plus rapide au sein d'une grande masse de gaz, parce qu'il n'y a pas alors de chaleur perdue et que les molécules acquièrent, par leur expansion subite, une vitesse de translation considérable.

594. **Combinaisons lentes.** — Il se présente plusieurs cas où l'inflammation ne se propage pas d'une manière sensible, même pour des mélanges dans lesquels la proportion des gaz est exactement celle qui convient à la combinaison, soit parce que le dégagement de chaleur est trop faible pour échauffer les couches voisines jusqu'à la température de combustion, soit que le composé se forme avec absorption de chaleur, soit encore que les décharges électriques aient une action propre, indépendante de l'élévation de température.

Priestley avait remarqué que l'air atmosphérique traversé par une série d'étincelles diminue de volume et acquiert la propriété de rougir la teinture de tournesol. Cavendish [2] a profité de cette observation pour déterminer par synthèse la composi-

[1] *Leçons sur la dissociation*, p. 5[illegible].
[2] *Phil. trans. abridged* (1788), vol. XVI, p. 451.

tion de l'acide nitrique. Il fit passer une série d'étincelles au travers d'un mélange d'oxygène et d'azote en présence de l'eau de chaux. Le gaz était contenu dans la partie supérieure d'un tube en V renversé (fig. 216), à cheval sur deux verres renfermant du mercure dont l'un communiquait avec une machine électrique et l'autre avec le sol. Cavendish trouva ainsi que la combinaison avait lieu entre 7 volumes d'oxygène et 3 volumes d'azote; le rapport de ces nombres est égal à 2,33, et diffère très peu du rapport véritable 2,5 déterminé par Gay-Lussac. M. Perrot a obtenu jusqu'à 100 milligrammes d'acide azotique par heure, en faisant passer un courant d'air dans un tube capillaire qui était traversé transversalement par une série d'étincelles d'induction.

Fig. 216.

L'acide azotique n'est ici que le résultat d'une réaction secondaire, car la combinaison qui s'effectue directement sous l'influence de l'étincelle est de l'acide hypoazotique, ou du bioxyde d'azote qui se transforme au contact de l'air en vapeurs nitreuses. Si l'on fait passer une série d'étincelles dans un ballon renfermant de l'air parfaitement sec, on voit rapidement le gaz prendre la couleur rutilante qui est le caractère de l'acide hypoazotique. Si le ballon renferme en même temps une solution alcaline ou si les parois du verre sont simplement mouillées, l'acide hypoazotique produit rapidement, par suite des réactions bien connues de ce gaz, une solution d'acide azotique.

Il faut remarquer cependant que la formation d'acide hypoazotique exige des décharges en forme d'étincelles; l'effluve électrique ne provoque pas la combinaison de l'azote avec l'oxygène et ne fait que transformer ce dernier gaz en ozone; il est probable qu'alors la température n'est pas assez élevée.

595. Il semble que l'électricité joue un rôle nécessaire dans la formation directe des composés de l'oxygène et de l'azote, car on n'est pas encore parvenu à combiner les deux gaz par la seule élévation de température. Cependant cette combinaison s'effec-

tue, comme par entraînement, dans un certain nombre de circonstances où l'électricité n'intervient pas. Ainsi l'eau que l'on forme en brûlant de l'hydrogène dans l'air est toujours acide, les produits de la combustion complète des carbures d'hydrogène et du gaz d'éclairage renferment des traces de composés nitrés, et l'explosion d'un mélange d'hydrogène et d'oxygène dans un eudiomètre, en présence d'une petite quantité d'air, entraîne la combinaison plus ou moins complète de l'azote avec l'oxygène. M. Bunsen (1) a reconnu que cette combinaison n'a pas lieu d'une manière sensible tant que le volume des gaz tonnants est inférieur aux $\frac{5}{6}$ du volume total; mais, si l'on fait brûler 9 volumes de gaz tonnants mélangés avec 4 volumes d'air, il disparaît pendant l'opération 0,12 du volume de l'air. Avec une proportion plus grande encore des gaz de l'eau, il se forme une telle quantité d'acide nitrique, que le mercure est attaqué avec dégagement de bioxyde d'azote, et qu'on peut recueillir sur les parois du tube des cristaux d'azotate de mercure.

596. L'acétylène donne lieu à des observations tout à fait analogues. M. Berthelot (2) a obtenu ce gaz à l'aide de l'arc produit par une pile électrique entre deux cônes de charbon dans un courant d'hydrogène; mais la chaleur seule, les décharges de batteries et les étincelles d'induction sont impuissantes pour effectuer cette combinaison directe. Si l'on part d'un carbure d'hydrogène, au contraire, on peut produire de l'acétylène dans une foule de circonstances. Le passage du gaz oléfiant, de la vapeur d'alcool, d'éther, d'aldéhyde, etc., dans un tube chauffé au rouge; les étincelles d'induction dans un gaz carburé ou une vapeur quelconque de substance organique; la combustion incomplète du gaz d'éclairage, de la benzine et d'une huile quelconque; toutes ces circonstances produisent de l'acétylène en quantité plus ou moins grande. Il est donc à présumer que l'action de l'arc électrique est due, non pas à un effet particulier de l'électricité, mais à la grande quantité de chaleur qui s'y dégage et à l'excessive température.

Nous citerons encore l'acide cyanhydrique, que M. Berthelot (3)

(1) *Méthodes gazométriques*, traduction française, p. 65.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LXVII, p. 64.
(3) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XVIII, p. 162.

a obtenu en faisant traverser par des étincelles électriques un mélange d'acétylène et d'azote, et qui se produit, soit directement, soit par l'intermédiaire de l'acétylène, toutes les fois que des étincelles puissantes traversent un gaz carburé quelconque contenant de l'azote.

Les combinaisons qui s'effectuent par une action progressive de l'électricité paraissent assez nombreuses, mais il est souvent difficile de les observer à cause des réactions consécutives qui tendent à les détruire ; nous reviendrons sur ce point.

M. Arn. Thénard, en faisant agir les effluves électriques sur un mélange à volumes égaux d'acide carbonique et de protocarbure d'hydrogène, ou d'oxyde de carbone et d'hydrogène, a obtenu un liquide oléagineux (1). Cet expérience présente un intérêt particulier parce que le composé ainsi produit renferme des équivalents égaux de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, et présente, par conséquent, la même composition que l'acide acétique et la cellulose. Sous l'influence des effluves, l'acétylène se condense aussi en un corps liquide et même en un solide (2).

597. **Décompositions.** — Beccaria, dès 1758 (3) parvint à réduire des oxydes et à revivifier les métaux par les décharges électriques, et décomposa le sulfure de mercure. De Milly (4) réduisit de même le minium, la céruse, les chaux de bismuth, d'étain et de zinc ; il plaçait ces poudres entre deux cartons ou deux lames de verre et les faisait traverser par la décharge d'une batterie. Morgan observa que le passage des étincelles dans les liquides mauvais conducteurs, tels que les huiles et les essences, y produit un dépôt de charbon. Enfin Beccaria avait constaté aussi que les étincelles provoquaient dans l'eau un petit dégagement de gaz.

La plupart au moins de ces décompositions ne doivent être attribuées qu'à l'élévation de température. M. Grove (5) a montré, en effet, que l'eau peut être décomposée en partie à une température bien inférieure à celle que produit la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène : un fil de platine porté à l'incandes-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXVI, p. 517 et 983.
(2) *Ibid.* t. LXXVIII, p. 219.
(3) *Lettere dell' electricismo*, p. 282.
(4) *Journal de Physique de l'abbé Rozier*, t. IV, p. 146.
(5) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXI, p. 129.

cence dans l'eau par un courant électrique, ou chauffé simplement avec un chalumeau, donne des bulles formées d'un mélange d'hydrogène et d'oxygène; le platine fondu versé dans l'eau dégage des gaz en grande abondance, etc.

598. Un grand nombre de gaz peuvent être décomposés par une série d'étincelles électriques. Van Marum a triplé ainsi le volume du bicarbure d'hydrogène; M. Grove et M. Perrot ont montré que les vapeurs d'eau, d'alcool et de plusieurs composés organiques sont aussi décomposés [1]. Il arrive souvent que l'opération a une limite naturelle, lorsque les corps qui proviennent de la décomposition restent à l'état gazeux et sont capables de se combiner directement avec explosion; la décomposition n'est évidemment plus possible à partir du moment où une proportion nouvelle des gaz séparés rendrait le mélange explosible dans les couches que traverse l'étincelle. Il s'établit donc un équilibre entre le composé primitif et les produits de la dissociation, et cet équilibre dépend en partie de l'énergie des décharges.

Priestley avait remarqué que l'acide carbonique traversé par un grand nombre d'étincelles augmente de volume et n'est plus entièrement absorbable par l'eau de chaux. Monge [2], se servant d'excitateurs en fer pour répéter cette expérience, ne vit qu'un faible changement de volume, mais les métaux étaient oxydés et plus d'un tiers du gaz n'était plus absorbable par les alcalis ni inflammable. De Saussure [3] fit passer des étincelles pendant 18 heures entre une tige de cuivre et la surface du mercure dans un matras plein d'acide carbonique : le volume ne fut pas modifié, mais le mercure était noirci et le gaz renfermait 8 pour cent d'oxyde de carbone. M. H. Sainte-Claire Deville [4], avec des étincelles très-courtes entre des fils de platine, obtint au bout de 3 fois 24 heures un accroissement de volume de $\frac{1}{7}$, ce qui correspond à une décomposition des 28 centièmes du gaz primitif. M. Berthelot a constaté [5] que la décomposition de l'acide carbonique par une série d'étincelles augmente d'abord, puis diminue et éprouve plusieurs oscillations qui tiennent sans doute à des

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXXIII, p. 876 et t. LXI, p. 161
[2] *Mém. de l'Académie* (1786), p. 450.
[3] *Journal des mines*, t. XII, p. 105 (1802).
[4] *Loc. cit.* p. 74.
[5] *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XVIII, p. 179 et 209.

changements dans l'énergie des décharges. La décomposition paraît d'autant plus avancée que les étincelles sont plus faibles; on peut décomposer jusqu'à 0,29 d'acide carbonique, et cette proportion est très-voisine de la limite (0,33) à partir de laquelle le mélange serait explosible. M. Arn. Thénard a obtenu à peu près les mêmes résultats au moyen de l'effluve électrique, et vérifié qu'alors quelques étincelles plus fortes ramenaient le mélange à 7 pour 100 d'oxyde de carbone (1).

L'acétylène est aussi décomposé par les étincelles, mais, à l'inverse de ce qui a lieu pour l'acide carbonique, le mélange tend vers une composition fixe renfermant 0,12 d'acétylène, même quand la pression du gaz varie entre $0^{m},40$ et $3^{m},50$.

L'acide hypoazotique, qui se produit directement par l'action des étincelles est détruit en partie en azote et en oxygène par la même cause. M. Berthelot a obtenu, par exemple, au bout de dix-huit heures un mélange qui ne contenait plus que 0,14 de gaz non décomposé. Le protoxyde d'azote donne aussi de l'azote et du bioxyde, et le bioxyde lui-même se décompose partiellement d'abord en protoxyde et acide hypoazotique, puis finalement en azote et vapeur nitreuse (2). On peut prévoir que ces problèmes d'équilibre chimique, déjà mal définis quand le gaz composé est en présence des seuls produits de la dissociation, deviennent beaucoup plus complexes si l'on augmente la proportion de l'un des gaz constituants et si l'on introduit dans le mélange un gaz étranger, lequel peut intervenir lui-même d'une manière plus ou moins directe dans les produits définitifs. Nous renvoyons au mémoire déjà cité de M. Berthelot pour l'étude de ces phénomènes, tels que la décomposition de la vapeur d'eau, l'action de l'hydrogène sur l'acide carbonique signalée d'abord par de Saussure, l'influence de la pression sur les états d'équilibre, etc.

M. Perrot a cherché quelle est l'influence de la forme des décharges d'induction sur le travail chimique accompli. Il a constaté que, dans une étincelle composée d'aigrettes et de traits de feu, la décomposition provoquée par l'aigrette est beaucoup plus abondante; le phénomène présente alors une sorte de conti-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXV, p. 118.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 5e série, t. VI, p. 199.

nuité qui permet de comparer les effets des aigrettes à ceux des courants électriques.

599. Si l'un des produits de la réaction s'élimine naturellement par un changement d'état, ou si on le fait disparaître à mesure de sa formation à l'aide d'absorbants chimiques, on peut continuer les décompositions par l'étincelle beaucoup plus loin et même les achever complétement, comme M. Deville l'a montré par plusieurs exemples. L'acide sulfureux est ainsi décomposé en soufre et acide sulfurique, mais en quantité inappréciable; si l'on introduit dans l'eudiomètre une solution de chlorure de baryum, le gaz disparaît peu à peu d'une manière complète : il se forme un précipité de sulfate de baryte et un dépôt de soufre sur les parois de l'éprouvette.

L'acide chlorhydrique est de même décomposé en chlore qui se combine avec le mercure et en hydrogène; mais la présence de ce dernier gaz dans le mélange empêche la réaction de continuer, et l'on ne peut guère décomposer par les étincelles plus de 0,03 du volume primitif.

L'oxyde de carbone est décomposé en charbon et en acide carbonique ; il suffit d'introduire dans l'éprouvette une dissolution de potasse pour que le gaz soit absorbé d'une manière complète, en même temps qu'il se forme comme une neige de noir de fumée au sommet du tube, entre les fils de platine où se produit l'étincelle.

Inversement, comme nous l'avons vu, l'acide carbonique se transforme en oxyde de carbone et en oxygène, de sorte que si l'on introduit dans l'eudiomètre un corps capable d'absorber l'oxygène, comme un morceau de phosphore, les produits de cette réaction seront finalement du charbon solide et de l'oxygène, et le gaz disparaîtra complétement. Le cyanogène se décompose aussi totalement en azote et en charbon.

Enfin l'ammoniaque est décomposée par une série d'étincelles en azote et hydrogène, comme l'a observé Van Marum, et l'opération est tellement voisine d'être complète, qu'il est difficile de constater directement qu'une portion du gaz est encore absorbable par l'eau et les acides. Cependant il y reste de l'ammoniaque, car l'azote et l'hydrogène se combinent partiellement sous l'influence des étincelles. Pour le démontrer, il suf-

fit d'introduire dans l'éprouvette, au moment où le gaz paraît totalement décomposé, un volume d'acide chlorhydrique égal au volume primitif de l'ammoniaque, et de faire continuer l'action des étincelles. Au bout de plusieurs heures, l'éprouvette se remplit de mercure et la partie supérieure est tapissée d'une couche de sel ammoniac.

600. **Phénomènes électrolytiques.** — Dans la plupart des décompositions qui précèdent, sinon dans toutes, l'action des étincelles est due au dégagement de chaleur; mais, après la découverte de Nicholson et Carlisle (1) qui décomposèrent l'eau avec séparation des deux gaz par la pile de Volta, on chercha à obtenir les mêmes effets avec l'électricité des machines.

Déjà Paets van Troostwik et Deiman avaient décomposé l'eau en y faisant passer des étincelles entre deux fils d'or ou de platine plongés dans le liquide et éloignés l'un de l'autre de quelques millimètres. Pearson reprenant cette expérience en 1797 (2) obtint en 3 heures, par exemple, après 1600 étincelles d'une machine à plateau d'un mètre de diamètre, environ $\frac{1}{180}$ de pouce cube d'un gaz qui détonait sous l'influence d'une étincelle en ne laissant qu'un résidu insensible. Wollaston, en 1800 (3), montra qu'on obtient une décomposition plus active quand on se rapproche autant que possible des conditions dans lesquelles on opère avec la pile voltaïque, en faisant pénétrer l'électricité dans le liquide par un conducteur qui présente la plus petite surface possible. Il introduisit un fil d'or de $\frac{1}{30}$ de millimètre de diamètre environ dans un tube de verre capillaire, et, après avoir fondu le verre de manière à noyer l'extrémité du fil, il l'usa graduellement jusqu'à ce que le fil fût mis à nu. En plongeant dans l'eau deux fils pareils dont l'un communiquait avec le sol et l'autre avec la machine, et ménageant sur cette dernière communication une étincelle auxiliaire de longueur convenable, il observa sur les deux fils un dégagement continu de petites bulles de gaz. Avec des fils plus fins encore, l'étincelle auxiliaire n'est pas nécessaire et l'on peut maintenir une communication continue entre la machine et l'un des fils. Toutefois, Wollaston n'obtint jamais à chaque fil

(1) *Bibl. britann.*, t. XV, p. 11.
(2) *Phil. trans. abridged*, vol. XVIII, p. 101.
(3) *Phil. trans.* (1801), part. II, p. 427.

qu'un mélange d'hydrogène et d'oxygène ; mais, en plongeant dans une dissolution d'azotate de cuivre deux fils d'argent recouverts de cire, sauf à leur extrémité, il remarqua qu'après cent tours de la machine le fil négatif était couvert d'un dépôt de cuivre, tandis que le fil positif ne présentait rien de semblable. De même, ayant fait passer une série d'étincelles entre deux fils d'or placés à 25 millimètres de distance sur une carte colorée par de la teinture de tournesol, il vit une tache rouge se former autour de l'électrode positive. Il résulte de là que l'électricité positive a une action oxydante et que l'électricité négative est surtout réductrice. M. Bonijol (1) était parvenu à décomposer l'eau par l'électricité atmosphérique, et même la potasse et le chlorure d'argent par l'électricité ordinaire; mais l'analogie des machines électriques avec la pile de Volta ne fut bien démontrée que par les expériences de Faraday (2).

601. Faraday dispose sur une lame de verre deux petits morceaux de feuilles d'étain M et M' (fig. 217) dont le premier communique avec le conducteur positif d'une machine électrique et le second avec le sol (ou avec le conducteur négatif, si l'on emploie une machine à deux conducteurs, comme celle de Nairne). Sur le milieu de la plaque il dépose une goutte d'une dissolution de sulfate de cuivre dont il fait communiquer les extrémités avec les feuilles d'étain par des fils de platine *s* et *s'*. Lorsque la machine fonctionne, l'extrémité du premier fil *p* est positive, l'extrémité *n* du second est négative, et au bout de peu de temps il se dépose sur celle-ci une couche de cuivre métallique.

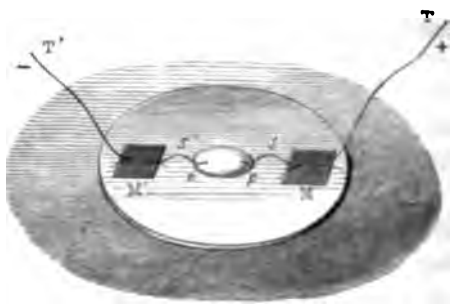


Fig. 217.

Pour montrer que l'on peut ainsi provoquer des décompositions successives dans un même circuit, Faraday dispose sur une lame de verre (fig. 218) plusieurs bandes de papier imbi-

(1) *Bibl. universelle de Genève* 1830), t. XLV, p. 213.
(2) *Exp. Researches*, t. I, p. 127.

bées de dissolutions salines : l'une d'iodure de potassium avec des traces d'amidon, la seconde de sulfate de soude coloré en bleu par du tournesol, la troisième imbibée aussi de sulfate de soude, mais colorée par le tournesol bleu dans la moitié qui est en contact avec le pôle positif, et par du jaune de curcuma sur l'autre moitié. Ces bandes de papier étant réunies entre elles par des fils de platine, il fait communiquer l'extrémité T avec

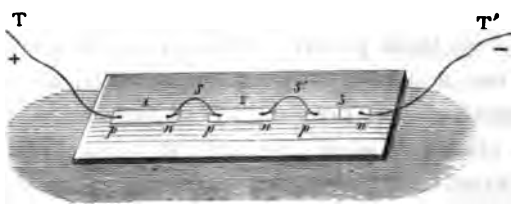


Fig. 218.

la machine et l'autre T' avec le sol : le premier papier bleuit au pôle positif par suite de l'iode mis en liberté, le second rougit au pôle positif, le troisième rougit encore au pôle positif et le curcuma qui entoure le pôle négatif donne aussi une tache rouge due à l'action de la soude sur cette teinture.

Il n'est même pas nécessaire d'établir une communication conductrice entre les bandes de papier; on peut les tailler en

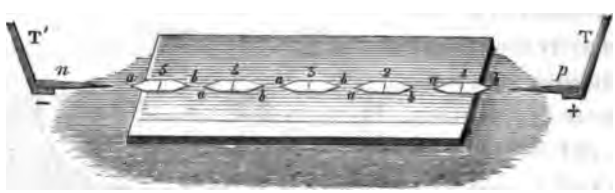


Fig. 219.

pointes, les placer à la suite l'une de l'autre sur une lame de verre, et disposer en face des extrémités de cette chaîne (fig. 219) deux conducteurs T et T' terminés aussi en pointes. Si toutes ces bandes de papier imbibées de sulfate de soude sont colorées de tournesol bleu dans les moitiés *a* dirigées du côté du conducteur négatif T', et teintes par le curcuma aux extrémités opposées, toutes les pointes se colorent en rouge par suite du flux d'électricité qui va de l'une à l'autre.

Enfin M. Armstrong[1] a obtenu, à l'aide de sa machine hydro-électrique, la décomposition de l'eau avec séparation complète des éléments. Deux cloches en verre très-étroites, traversées à la partie supérieure par des fils de platine, étant remplies d'eau et renversées dans un verre, il fit communiquer l'un des fils avec la chaudière de sa machine et l'autre fil avec le sol ou avec une suite d'autres cloches semblables renfermant des dissolutions de sels alcalins. Il vit bientôt des gaz se former dans les cloches en quantités inégales : de l'hydrogène pur aux pôles négatifs et un volume d'oxygène moitié moindre aux pôles positifs, en même temps que les solutions salines devenaient acides aux pôles positifs et alcalines aux pôles négatifs. La séparation des gaz n'était pas moins complète quand il établissait une interruption sur le trajet de ces appareils à la machine, de manière à provoquer la décharge sous forme d'étincelles.

Il y a donc, d'après toutes ces expériences, la plus grande analogie entre le flux continu qui s'écoule d'une machine électrique et le courant d'une pile de Volta, au point de vue de la décomposition des corps avec séparation des éléments.

602. **De l'ozone.** — De même que les décompositions électrolytiques, la transformation d'oxygène en ozone sous l'influence de l'électricité ne peut pas non plus être attribuée simplement à l'action de la chaleur, car on ne connaît aucun moyen de préparer l'ozone par la chaleur seule ; en outre, ce gaz se détruit peu à peu dans un tube fermé maintenu à la température de 100°, et instantanément quand on le mélange avec de la vapeur d'eau bouillante.

Un bâton de soufre frotté dégage une odeur particulière qui est due sans doute à l'électrisation, car on retrouve la même odeur auprès d'une machine électrique et surtout dans le voisinage des points où se produisent des étincelles. Franklin fit remarquer que l'odeur de soufre se manifeste quelquefois avec une grande intensité par les temps d'orage, en particulier dans les endroits où la foudre est tombée, et il indiqua cette propriété comme une des analogies nombreuses qui existent entre la foudre et l'électricité.

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. X, p. 105.

Van Marum fit passer des étincelles pendant un quart d'heure dans une éprouvette renfermant de l'oxygène et renversée sur l'eau ; le volume diminua d'environ $\frac{1}{20}$ et « le gaz, dit-il, avait « pris une odeur très-forte, qui nous parut très-clairement être « l'odeur de la matière électrique, mais elle était beaucoup plus « forte que celle que nous avions ressentie auparavant. » Il répéta ensuite cette expérience sur le mercure et reconnut que la surface du liquide était fortement oxydée, en même temps que le gaz éprouvait une diminution de volume d'un tiers.

603. Ces observations étaient à peu près oubliées quand M. Schœnbein, en 1840, reconnut la même odeur et les mêmes propriétés oxydantes dans l'oxygène produit par la décomposition électrolytique de l'eau qui renferme l'un des acides sulfurique, azotique, phosphorique, ou quelques sels oxygénés. Si l'eau renferme au contraire des chlorures, bromures ou iodures, l'oxygène ne possède plus aucune activité particulière. Depuis cette époque, M. Schœnbein lui-même et plusieurs autres chimistes ont démontré qu'il se produit de l'ozone dans un grand nombre de réactions chimiques où l'électricité n'intervient pas, telles que l'oxydation du phosphore humide dans l'oxygène, la décomposition du bioxyde de barium, de l'acide chromique, du permanganate de potasse, etc.

L'ozone ou oxygène électrisé jouit de propriétés remarquables. Il a une odeur nauséabonde, attaque les muqueuses et provoque des crachements de sang quand on le respire en quantité notable.

Lorsqu'il est humide, il oxyde rapidement le mercure, l'argent et la plupart des métaux à la température ordinaire ; il allume le phosphore et produit avec l'iode d'abondantes vapeurs blanches. Il agit comme le chlore et le brome sur du papier imprégné d'iodure de potassium et le colore en bleu par l'iode mis en liberté. L'ozone décolore rapidement les couleurs organiques, comme celles des dérivés d'aniline ou même la solution d'indigo dans l'acide sulfurique ; il transforme l'acide sulfureux en acide sulfurique, l'acide arsénieux en acide arsénique, l'ammoniaque et les composés nitrés en acide azotique, etc.; il détruit la plu-

(1) *Description d'une très-grande machine électrique*, etc., Harlem (1785), p. 116.

part des matières organiques, altère rapidement le caoutchouc, le perce et le rend cassant, etc. Les propriétés oxydantes de l'ozone sec, au contraire, diffèrent peu de celles de l'oxygène.

604. A l'aide de ces caractères de l'ozone, il est facile d'en constater la présence dans un grand nombre d'expériences d'électricité. L'air qui a passé entre les plateaux d'une machine de Holtz est très-odorant. Les aigrettes qui se dégagent des conducteurs électrisés, les décharges des batteries, etc., produisent de l'ozone, et, quand on a répété un certain nombre d'expériences d'électricité dans une salle fermée, on sent bientôt partout cette odeur de soufre qui est due à une petite quantité d'ozone.

Ainsi encore, l'air raréfié qui a été traversé par un grand nombre d'étincelles, comme dans l'expérience du matras de Nollet, possède une odeur tout à fait nauséabonde, malgré la grande quantité d'air ordinaire avec laquelle on a été obligé de le mélanger pour rétablir la pression extérieure avant d'enlever la cloche.

L'odeur provoquée par les étincelles dans l'air pourrait être attribuée en partie à la production de composés oxygénés de l'azote (et M. Schœnbein avait cru d'abord que la présence de l'azote était nécessaire à la formation de l'ozone) ; mais cette odeur est tellement particulière, qu'on peut en conclure l'existence d'un corps nouveau. MM. Marignac et De la Rive ont démontré, en 1846 (1), que l'oxygène pur et sec acquiert les propriétés de l'ozone quand on le fait traverser par un grand nombre d'étincelles très-petites; peu de temps après, MM. Ed. Becquerel et Fremy ont vérifié d'une manière générale que toutes les formes d'étincelles électriques produisent de l'ozone en quantité plus ou moins grande, et qu'il suffit même de faire passer des décharges entre deux pointes autour d'un tube de verre scellé à la lampe et renfermant de l'oxygène sec, pour que le gaz ait l'odeur et les propriétés de l'ozone (2).

Dans cette dernière expérience, comme dans toutes celles où l'on obtient des décharges alternatives par simple influence sur les gaz, les étincelles sont moins intenses, plus larges, et se montrent particulièrement propres à produire de l'ozone. Telles

(1) *Archives de l'Électricité*, t. V, p. 5.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXXV, p. 84.

sont encore : l'expérience du matras de Nollet, celle du tube à air raréfié avec armatures latérales (779), la pluie de feu électrique et tous les appareils à effluves.

605. Malgré l'énergie des propriétés que nous avons signalées, l'oxygène ainsi préparé, soit par les procédés chimiques, soit par l'emploi de la pile ou des étincelles, ne renferme jamais qu'une quantité d'ozone pur extrêmement faible, ce qui rend l'étude de ce corps très-difficile.

MM. Andrews et Tait (1) ont vérifié, en provoquant des étincelles entre des fils de platine dans de l'oxygène sec, que ce gaz diminue sensiblement de volume, comme l'avait annoncé Van Marum, que l'oxygène ozoné reprend son volume primitif quand on détruit l'ozone par la chaleur, mais qu'il ne change pas de volume quand on le traite par l'iodure de potassium ou l'acide arsénieux; la portion de l'oxygène qui correspond à la diminution de volume est donc la seule qui disparaisse en général dans les phénomènes d'oxydation. Si l'on considère l'ozone comme une combinaison d'oxygène modifié avec de l'oxygène ordinaire, dans laquelle ce dernier gaz occupe le volume du composé, on est porté, par analogie avec la composition de l'eau, à admettre que l'ozone est formé de 3 volumes d'oxygène condensés en 2 volumes, c'est-à-dire que la densité de l'ozone est égale à une fois et demie celle de l'oxygène. M. Soret (2) a constaté en effet que l'oxygène ozoné, traité par l'essence de térébenthine ou l'essence de cannelle, produit des vapeurs abondantes et éprouve alors une diminution de volume double de celui qui correspond à l'oxygène absorbé par l'iodure de potassium; dans ce cas, l'ozone aurait disparu complétement. M. Thénard a constaté aussi que l'oxydation de l'indigo enlève à l'ozone trois fois autant d'oxygène que l'acide arsénieux. Des expériences très-délicates sur la diffusion de l'ozone comparée à celles du chlore et de l'acide carbonique ont encore conduit M. Soret à admettre pour l'ozone la même densité.

MM. Andrews et Tait ont obtenu, par l'action de décharges silencieuses entre des fils de platine, une contraction de l'oxygène égale au $\frac{1}{12}$ du volume primitif; le passage de quelques étin-

(1) *Phil. trans.* (1860), part. I, p. 113.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. VII, p. 113, et t. XIII, p. 257.

celles électriques dilatait alors le gaz jusqu'à ce qu'il eût repris les $\frac{2}{3}$ de la contraction. Dans le premier cas, les $\frac{3}{11}$ ou le quart de l'oxygène serait donc intervenu dans la formation de l'ozone, ce qui serait une proportion énorme.

En décomposant de l'eau additionnée d'un cinquième d'acide sulfurique dans un grand voltamètre refroidi à 5 ou 6 degrés au-dessous de zéro, et dont les électrodes étaient séparées par un diaphragme poreux, M. Soret a obtenu dans l'oxygène à peine 6 pour 100 d'ozone pur dont 2 seulement étaient absorbables par l'iodure de potassium, et les appareils ordinaires à effluves ne permettant guère de dépasser cette proportion. Comme l'efficacité des décharges pour ce genre d'expériences paraît d'autant plus grande que l'échauffement du gaz est moindre, il semble que l'on devrait obtenir une richesse en ozone notablement plus grande en agissant sur de l'oxygène à une faible pression ; l'odeur repoussante qui se produit dans l'expérience du matras de Nollet semble confirmer cette manière de voir.

AIMANTATION ET INDUCTION PAR LA DÉCHARGE.

606. **Observations anciennes.** — Franklin paraît avoir observé pour la première fois que les décharges électriques peuvent aimanter une aiguille d'acier placée dans le voisinage, ou modifier et même intervertir l'aimantation d'une aiguille aimantée. Cette observation, qui a été confirmée par la plupart des électriciens du siècle dernier, ne présenta d'abord que l'intérêt d'une analogie nouvelle entre l'électricité et la foudre ; mais la découverte d'Œrstedt, en 1820, sur la déviation que le courant électrique d'une pile de Volta fermée imprime à l'aiguille aimantée, les expériences d'Arago sur l'aimantation du fer et de l'acier par les courants, et les mémorables travaux d'Ampère ramenèrent l'attention sur les propriétés analogues des décharges électriques. Arago ne tarda pas à reconnaître que le courant continu d'électricité qui s'écoule d'une machine à frottement possède la propriété de rendre l'acier magnétique, dès qu'en interrompant le conducteur on provoque la formation d'une série de petites étincelles. Ridolfi montra que ces étincelles ne sont pas nécessaires

et que si on relie d'une manière permanente, par l'intermédiaire d'une bobine dont les différentes spires sont bien isolées, le conducteur et les coussins d'une machine électrique, on peut dévier une aiguille aimantée et aimanter le fer doux ou l'acier.

Arago avait songé à utiliser l'aimantation des aiguilles d'acier afin de comparer les conductibilités de différents métaux pour les décharges électriques; il voulait faire passer la décharge d'une batterie par une série de fils parallèles de mêmes dimensions et de métaux différents, et comparer l'aimantation communiquée par ces différents conducteurs à des aiguilles d'acier. Ces expériences n'ont pas été réalisées; elles n'auraient pas donné d'ailleurs le résultat qu'en attendait Arago, car l'aimantation des aiguilles d'acier par les décharges électriques s'effectue tantôt dans un sens tantôt dans l'autre, avec une énergie très-variable, suivant qu'on modifie les dimensions des aiguilles, leur distance à l'arc conducteur, la résistance du circuit ou la puissance de la décharge. Savary a étudié avec soin toutes les circonstances de ce phénomène [1].

607. **Expériences de Savary.** — Savary tendait un fil métallique horizontalement au-dessus d'une table, et il plaçait au-dessous de ce fil, à différentes hauteurs, une série d'aiguilles d'acier très-fines disposées parallèlement entre elles et perpendiculairement à la direction du fil; il suffisait pour cela de les mettre sur une petite règle inclinée. Après avoir fait passer par le fil la décharge d'une batterie, il vérifiait si les aiguilles avaient été aimantées en les plongeant dans la limaille de fer; il déterminait ensuite le sens de l'aimantation, puis l'intensité magnétique en les faisant osciller sous l'influence de la terre. Les expériences ont montré que l'aimantation obéit alors à des lois très-complexes.

Les aiguilles les plus éloignées sont aimantées faiblement, mais dans le sens direct ou positif, c'est-à-dire que le pôle Nord est situé à la gauche d'un observateur qui, tout en regardant l'aiguille, suivrait le fil dans le sens parcouru par l'électricité positive pendant la décharge; l'aimantation est alors de même signe que si l'aiguille eût été soumise à l'influence d'un courant vol-

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXXIV, p. 5.

laïque permanent de même direction que la décharge. A mesure que les aiguilles sont plus rapprochées du fil, l'aimantation augmente d'abord et passe par un maximum, puis diminue et devient nulle; l'aimantation se produit ensuite en sens contraire ou négatif, passe par un nouveau maximum, change de nouveau de signe, et ainsi de suite. Les dernières aiguilles, celles qui sont en contact avec le fil, s'aimantent aussi positivement en général, de sorte que le nombre des inversions est toujours pair, sauf de très-rares exceptions.

608. Nous citerons ici, comme exemple, une des expériences de Savary. Les aiguilles avaient 15 millimètres de longueur et la décharge passait dans un fil de platine de 1 mètre de longueur sur $0^{mm},25$ de diamètre.

ORDRE DES AIGUILLES	DISTANCE DE L'AIGUILLE AU FIL	DURÉE DE 30 OSCILLATIONS	SENS DE L'AIMANTATION
	mm.		
1re	0	1′ 3″,1	Positive.
2e	1,1	2 29	Négative.
3e	2	»	Nulle.
4e	3	1 25,6	Positive.
6e	5,5	1 3	Id. max.
8e	8	1 52	Id.
9e	8,6	3 8	Négative.
14e	14,6	56	Id. max.
21e	21,4	»	Id. presque nulle
22e	23,3	1 25,7	Positive.
24e	44	54	Id. max.
27e	150	1 28,2	Id.

La longueur des aiguilles n'a pas d'influence appréciable, car des aiguilles de 15, 10 et 5 millimètres ont montré les mêmes changements de signe, et sensiblement aux mêmes distances du fil de décharge. Le diamètre, au contraire, a une influence très-notable : ainsi, en opérant dans les mêmes conditions, les aiguilles de $0^{mm},30$ de diamètre ont donné lieu à deux changements de signe, tandis qu'avec des aiguilles de $0^{mm},80$ et de $1^{mm},75$ de diamètre, l'aimantation a été positive pour toutes les distances. De même, le nombre des inversions est d'autant plus grand

que la trempe de l'acier est plus énergique; des aiguilles suffisamment recuites finissent par s'aimanter toutes de la même manière et positivement.

Les différentes parties du circuit traversé par la décharge ont exactement la même action, ce qui se conçoit *à priori* puisque le même phénomène électrique a lieu en tous les points; Savary l'a vérifié en formant un circuit par des fils métalliques de diamètres inégaux ajoutés bout à bout : les aiguilles situées à la même distance de ces différents fils furent aimantées sensiblement de la même manière.

L'énergie et la durée de la décharge sont les circonstances qui présentent le plus d'intérêt. Quand on augmente la puissance de la décharge, soit en multipliant les bouteilles de la batterie pour une même distance explosive, soit en élevant le potentiel, l'aimantation des aiguilles devient plus énergique, mais en même temps les inversions sont plus nombreuses. D'autre part, si l'on ralentit la décharge en augmentant la résistance du fil, les alternatives diminuent de plus en plus et toutes les aiguilles finissent par s'aimanter positivement.

Toutefois, quand on supprime ainsi les changements de signe de l'aimantation, en augmentant le diamètre des aiguilles, en diminuant la trempe ou l'énergie de la charge, ou en faisant croître la résistance du circuit, les aiguilles présentent encore un certain nombre de maxima et de minima d'aimantation; ce n'est que pour des charges très-faibles ou des résistances considérables que le magnétisme des aiguilles diminue d'une manière continue à mesure qu'elles sont plus éloignées du fil de décharge, comme on l'observerait pour le courant permanent d'une pile voltaïque.

Le passage de la décharge dans un fil conducteur enroulé en hélice exerce la même action sur les aiguilles placées dans l'intérieur de l'hélice. Ainsi Savary a formé une hélice avec un fil de cuivre de $0^{m},80$ de longueur et de $0^{mm},18$ de diamètre, enroulé sur un cylindre de bois de $6^{mm},5$ de diamètre, les spires étant écartées l'une de l'autre de 3^{mm}. En plaçant dans l'intérieur de cette hélice des aiguilles d'acier de 15^{mm} de longueur et de $0^{mm},25$ de diamètre, il a observé jusqu'à 6 inversions, à mesure que l'intensité de la décharge allait en diminuant. Quand

on allonge le fil, on diminue aussi le nombre des inversions, comme dans les expériences sur les fils rectilignes.

Ces phénomènes ne peuvent guère s'expliquer par les oscillations qu'éprouve la décharge quand elle s'effectue par un circuit de faible résistance (446), parce qu'alors le sens de l'aimantation devrait être indépendant de la distance des aiguilles. Il paraît naturel, au contraire, d'admettre que les éléments magnétiques, déplacés d'une manière brusque au moment de la décharge, oscillent de part et d'autre d'une position d'équilibre et s'arrêtent dans un état quelconque lorsque le phénomène est trop rapide, tandis que les oscillations s'éteignent rapidement et qu'il se produit une aimantation régulière quand on opère avec un courant de durée appréciable.

609. **Expériences de M. Marianini.** — On peut aussi, quoique moins facilement, montrer l'aimantation du fer doux par la décharge. Pour cela, M. Marianini [1] place un morceau de fer doux dans l'intérieur d'une hélice magnétisante au-dessus de laquelle il suspend par un fil de cocon une petite aiguille aimantée; la bobine est orientée dans une direction perpendiculaire à celle que prend l'aiguille aimantée sous l'influence de la terre. Au moment où l'on fait passer une décharge dans le fil de la bobine, le noyau de fer doux s'aimante et fait dévier l'aiguille aimantée. Le sens et la grandeur de la déviation indiquent le sens et l'intensité de l'aimantation momentanée développée dans le fer doux : on reconnaît ainsi que le fer doux s'aimante toujours dans le sens direct.

M. Marianini a même fait de cette expérience le principe d'un appareil qu'il nomme *rhéélectromètre* et dont il propose l'emploi pour déterminer le sens d'une décharge; il faut avoir soin, dans ce cas, de recuire le fer doux après chaque expérience, afin de faire disparaître les traces de magnétisme rémanent qu'il est impossible d'éviter d'une manière absolue. Toutefois, si l'on veut se servir de cet appareil pour déterminer le sens dominant d'une décharge complexe ou de plusieurs décharges successives de sens contraires, on ne peut plus compter sur les indications de l'aiguille. En effet, le magnétisme rémanent dû à la première

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. X, p. 491.

décharge nuit à l'effet des suivantes, et l'énergie de l'aimantation dépend, non-seulement de la quantité d'électricité qui s'écoule, mais surtout de l'intensité, c'est-à-dire de la vitesse d'écoulement de l'électricité ; d'après cela, le signe de l'aimantation finale n'est pas nécessairement déterminé par la somme algébrique des courants ou des décharges. Le rhéélectromètre de M. Marianini ne doit donc être employé qu'avec précaution, mais c'est un instrument très-délicat qui permet de constater l'existence de courants extrêmement faibles.

610. **Découverte de l'induction voltaïque.** — En 1830, Faraday fit la découverte célèbre de l'induction électrique, c'est-à-dire de la production d'un courant dans un fil fermé sous l'influence d'un autre courant voisin ou d'un aimant. Rappelons seulement des expériences de Faraday les résultats suivants :

Quand on établit un courant dans un fil, ou qu'on interrompt un courant qui y existait, il naît dans un fil voisin un courant de sens contraire ou de même sens que le premier, c'est-à-dire, en d'autres termes, un courant inverse ou direct. Le courant influent que l'on a établi ou interrompu est appelé courant inducteur, et le courant développé par influence le courant induit. Par extension, on appelle circuit inducteur et circuit induit les conducteurs par lesquels se propagent ces deux courants. Les courants induits que l'on obtient ainsi ont une très-courte durée, de même ordre que celle qui a été nécessaire pour l'établissement ou la suppression du courant inducteur.

La loi est d'ailleurs plus générale et peut s'énoncer ainsi : Toutes les fois que l'intensité du courant qui circule dans un fil augmente ou diminue, sous l'influence d'une cause quelconque, il se produit dans un fil voisin un courant induit, inverse ou direct, dont la durée est égale à celle des variations qu'a subies le courant inducteur et dont l'intensité est d'autant plus grande que ces variations ont été plus brusques. La quantité d'électricité qui s'écoule dans le fil conducteur induit, c'est-à-dire $\int i dt$, i désignant l'intensité du courant pendant le temps dt, est d'ailleurs exactement proportionnelle à la variation du courant inducteur. Cet énoncé comprend le cas de l'expérience primitive, puisque l'établissement ou la suppression d'un courant ne

sont autre chose que des variations depuis zéro jusqu'à une valeur finie, dans un sens ou dans l'autre.

La décharge d'une batterie pouvant être assimilée à un courant dont l'intensité augmente rapidement à partir du zéro pour redevenir bientôt nulle, il était à prévoir, par analogie avec les expériences de Faraday, que les décharges ordinaires produiraient aussi des décharges induites.

611. **Décharge latérale et choc en retour.** — On peut rapprocher d'abord des phénomènes d'induction proprement dits, d'autres expériences plus anciennes, désignées sous les noms de *décharge latérale* et de *choc en retour*.

Priestley a remarqué que si l'on décharge une bouteille de Leyde par une chaîne métallique de manière que quelques anneaux de l'une des extrémités se trouvent en dehors du circuit, on voit, au moment de la décharge, partir des étincelles entre ces anneaux.

Voici encore une expérience analogue rapportée par Biot : Un cylindre conducteur isolé est mis en présence et à une petite distance d'un deuxième cylindre qui communique avec l'armature extérieure d'une batterie électrisée ; au moment de la décharge, une étincelle a lieu entre les deux cylindres, et le premier reste électrisé. Si ce cylindre communique avec le sol par un pistolet de Volta, la décharge latérale enflammera le gaz tonnant [1]. Ces expériences et plusieurs autres citées par Verdet [2] ne sont pas à proprement parler des décharges induites et s'expliquent simplement par l'influence que l'électricité en mouvement exerce sur les conducteurs voisins ; mais il y a d'autres phénomènes où l'induction paraît intervenir.

Ainsi, quand on réunit les armatures d'une bouteille de Leyde par un fil métallique de très-grande longueur M (fig. 220) dont deux portions *a* et *b* sont rapprochées à la distance de quelques millimètres, il s'y produit au moment de la décharge une étincelle au travers de l'air, malgré la plus grande résistance que présente la couche de gaz. Une partie seulement de la décharge passe par cette étincelle, car Priestley a montré que si l'on réunit les deux points *a* et *b* par un fil assez fin pour qu'il rougisse

(1) *Traité de Physique exp. et théorique*, t. II, p. 452.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXIV, p. 401.

à peine, puis que l'on répète la même expérience en coupant le circuit *aMb*, le fil entre alors en fusion (1).

Cette expérience est importante à signaler. On peut en conclure d'abord que la communication d'un paratonnerre avec le sol présenterait de véritables dangers si elle était établie par un conducteur sinueux dont deux parties se trouveraient trop rapprochées. Il en résulte aussi que le partage de la chaleur entre deux circuits dérivés, dans la décharge d'une batterie, ne se fait pas toujours suivant les lois que nous avons établies à propos des expériences de M. Riess (424). Guillemin (2) a démontré ce fait d'une autre manière. Il dispose parallèlement entre eux deux fils, l'un de cuivre, l'autre de plomb, de 12 à 15 mètres de longueur sur $1^{mm},3$ de diamètre, terminés à une des extrémités par de petits fils d'épreuve très-fins de fer ou de platine. En faisant

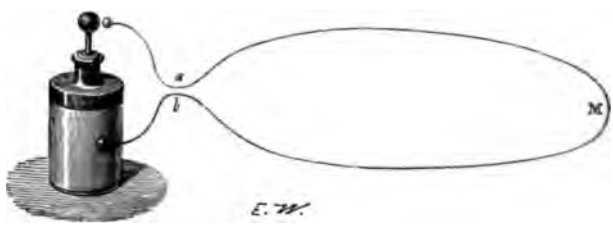


Fig. 220.

passer un courant continu assez intense dans ces deux fils disposés en dérivation, on constate par l'échauffement inégal des fils d'épreuve que le courant qui traverse le plomb est beaucoup plus faible, ce métal étant en effet 10 ou 12 fois moins conducteur que le cuivre. Mais, si l'on remplace le courant de la pile par une décharge de batterie, le fil d'épreuve qui correspond au plomb s'échauffe davantage et peut arriver à fondre lorsque l'autre est à peine porté au rouge sombre.

Si l'on remplace les fils de métaux différents par deux bobines de cuivre identiques, on remarque encore que l'introduction d'un morceau de fer doux dans une des bobines diminue beaucoup l'intensité de la décharge dérivée correspondante, tandis

(1) Cavallo. *Traité d'électricité*, p. 242.
(2) *Journal de Physique*, t. II, p. 50.

qu'un barreau de métal non magnétique facilite, au contraire, le passage de l'électricité.

612. Ces décharges latérales, soit dans des fils conducteurs, soit à travers l'air, peuvent causer de nombreuses erreurs dans les expériences; j'en citerai encore un exemple. Les deux pôles d'une machine de Holtz étant mises en communication séparément avec les armatures d'une batterie et les deux branches d'un excitateur, on vérifie aisément que le nombre de tours du plateau nécessaire pour provoquer la décharge est constant, de quelque manière que les communications soient établies. De même, si chacun des pôles communique d'abord avec l'armature correspondante, puis qu'un nouveau conducteur aille de cette armature à la branche de l'excitateur, on reconnaît encore que la charge explosive, évaluée par le nombre de tours, n'est pas sensiblement modifiée par une interruption de plusieurs centimètres sur le trajet de la machine à l'une des armatures; mais, dans le cas actuel, la disposition des conducteurs n'est plus indifférente. Supposons qu'une boule A communique par des tringles métalliques, d'une part avec une armature, d'autre part avec l'excitateur. En mettant cette boule en contact avec l'un des pôles, j'ai observé, par exemple, qu'il fallait 52 tours de plateau pour provoquer la décharge de la batterie. Quaud on éloignait cette boule du pôle correspondant à des distances de 1, 2, 3 et 5 centimètres, il ne fallait plus que 35, 32, 20 et 18 tours pour provoquer l'explosion par l'excitateur. Il serait absurde d'en conclure que le débit de la machine avait augmenté, mais l'étincelle de décharge devenait beaucoup plus faible, c'est-à-dire que la quantité d'électricité allait en diminuant.

613. Le *choc en retour* est un phénomène plus simple. C'est l'effet qui se manifeste dans un conducteur électrisé par influence, toutes les fois que le corps influent est déchargé ou éprouve un changement brusque d'état. Le choc en retour est d'autant plus intense que l'influence est elle-même plus grande; il augmente donc quand on met le corps influencé en communication avec le sol. On démontre habituellement ce phénomène par les effets physiologiques.

Pour cela, on suspend auprès d'un conducteur de machine électrique, par un crochet métallique en communication avec

le sol, des cuisses de grenouilles rattachées par les nerfs lombaires et préparées comme pour les recherches d'électricité dynamique. Chaque fois que l'on décharge le conducteur de la machine en tirant une étincelle, la grenouille éprouve des secousses violentes. Le conducteur formé par les cuisses de grenouille et le fil qui les relient avec le sol s'électrise lentement par influence pendant la charge de la machine, et cette électricité provoque des contractions musculaires quand elle s'écoule brusquement dans le sol au moment de la décharge.

Il n'est même pas nécessaire de dépouiller la grenouille; il suffit de la tenir suspendue auprès d'une machine par un crochet métallique passé dans la lèvre, pour observer les mêmes contractions à chaque étincelle.

On éprouve souvent des effets analogues dans le voisinage des machines électriques puissantes. Avec la grande machine de Van Marum (1), on ressentait des picotements à la tête et l'impression de toile d'araignée due au redressement des cheveux, jusqu'à la distance de 8 pieds du conducteur. A 2 pieds de distance, le choc en retour produisait une secousse dans les muscles de la poitrine et des épaules, et ce choc était encore sensible quand on s'éloignait à la distance de 8 pieds.

L'emploi des tubes lumineux permet de répéter cette expérience d'un manière très-simple. On prend, par exemple, les deux plateaux d'un condensateur d'Œpinus. L'un d'eux A est mis en communication avec le sol par l'intermédiaire d'un tube de Holtz à deux branches; l'autre plateau B communique avec l'un des pôles de la machine de Holtz dont les conducteurs sont assez rapprochés pour qu'il s'y produise de temps en temps des étincelles. Pendant que le plateau collecteur B s'électrise, par exemple positivement, l'une des branches du tube de Holtz s'illumine et indique un flux d'électricité positive qui s'écoule du plateau condenseur A vers le sol. Au moment où la machine se décharge, l'autre tube s'illumine plus vivement par suite d'un courant de sens contraire; cette illumination est d'autant plus brillante que la distance explosive de la machine est plus grande et les plateaux plus rapprochés.

(1) *Description d'une très-grande machine*, etc, p. 78.

614. **Induction par les décharges.** — Le premier phénomène produit par les décharges électriques qui correspondit exactement à l'induction voltaïque paraît avoir été observé par Masson en 1834 (1); mais plusieurs physiciens ont eu à la même époque, et d'une manière tout à fait indépendante, l'idée de recherches analogues qui se présentaient comme une conséquence naturelle de la découverte de Faraday.

Masson observa qu'un circuit fermé, dont une partie était dans le voisinage d'un fil traversé par la décharge, pouvait aimanter une aiguille d'acier, ce qui démontrait l'existence d'une décharge induite. Aimé, en 1836, obtint une étincelle par la décharge induite; pour cela il avait fixé sur les deux faces d'une lame de verre des bandes d'étain, de manière à former deux circuits métalliques parallèles et discontinus. Au moment où il faisait passer à travers l'un des circuits la décharge d'une bouteille de Leyde, des étincelles éclataient à toutes les solutions de continuité du deuxième circuit. Après ces premières expériences qui établissaient l'existence des décharges d'induction, il restait encore à déterminer quel en est le sens ou, si les décharges ne s'effectuent pas dans un sens déterminé, quelle est la nature du phénomène dont le fil induit est le siége.

En raisonnant par analogie avec ce qui se passe pour les courants induits produits par l'électricité voltaïque, on peut prévoir que la décharge induite doit être un effet complexe. Supposons même que la décharge inductrice soit unique, le courant produit dans le fil conjonctif est d'abord croissant, puis décroissant; d'après les lois de Faraday, il doit se produire dans le circuit induit deux décharges successives, la première inverse et la seconde directe, correspondant à des quantités d'électricité égales mais avec des intensités différentes, parce qu'il est à présumer que l'accroissement et la diminution de la décharge inductrice ont des durées très-inégales. Mais, si la décharge inductrice est soumise elle-même à des oscillations, comme l'indiquent les expériences de M. Feddersen, ces oscillations doivent se traduire dans le circuit induit par des alternatives correspondantes et deux fois plus nombreuses.

(1) Voir *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. LXXIV, p. 159, en note.

Enfin, le circuit traversé par ces décharges induites, que nous appellerons de premier ordre, peut lui-même agir sur un autre fil et y développer des décharges induites de second ordre, analogues aux courants induits successifs découverts par Henry (1); à chacune des décharges induites de premier ordre correspondront deux décharges de second ordre, de sorte que toute décharge d'un sens déterminé dans le circuit principal déterminera deux décharges de premier ordre, quatre décharges de second ordre, et ainsi de suite.

615. Si ces prévisions sont exactes, toutes les expériences dans lesquelles on s'est proposé de déterminer le sens de la décharge induite ne peuvent avoir donné que des résultats contradictoires et variables avec le procédé d'observation. Ainsi Henry (2) fit passer la décharge induite par une lame d'étain enroulée en hélice sur un tube de verre dans lequel il plaçait une aiguille d'acier; cette aiguille s'aimante toujours, mais le sens de l'aimantation ne permet pas de conclure le sens de la décharge, d'après les expériences de Savary. Verdet (3) a montré que le sens de l'aimantation des aiguilles n'était pas lui-même déterminé. Il fit passer la décharge inductrice par un fil de cuivre enroulé sur un tube de verre dans l'intérieur duquel était un autre tube entouré lui-même par le fil induit; les deux extrémités de ce fil étaient réunies par des hélices magnétisantes de diamètres différents où furent placées des aiguilles d'acier. Il arriva souvent que ces aiguilles, la décharge inductrice restant la même, furent aimantées en sens contraires les unes des autres.

M. Marianini, en substituant le fer doux à l'acier, a cru donner plus de rigueur à la méthode de l'aimantation (4); mais il a constaté lui-même que la déviation du rhéélectromètre intercalé sur le trajet direct d'une décharge n'est pas toujours de même sens, et qu'avec des décharges extrêmement faibles on peut obtenir une aimantation contraire à celle que produit toute décharge un peu intense. Le rhéélectromètre ne pouvait donc donner rien de certain sur le sens de la décharge induite.

(1) *Transactions of the american philosophical society*, t. VIII.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série t. III, p. 394.
(3) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXIV, p. 377.
(4) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. X, XI et XIII.

L'emploi des galvanomètres (328) semble permettre de résoudre la question; mais la décharge d'une batterie dans le fil d'un galvanomètre ne dévie l'aiguille dans un sens déterminé que si elle est ralentie suffisamment par l'interposition d'un médiocre conducteur dans le circuit. Quand on ne prend pas cette précaution et que les différentes spires du galvanomètre ne sont pas suffisamment isolées, on peut obtenir, il est vrai, des déviations très-considérables, mais ces déviations sont dues, tantôt à l'action que l'électricité libre exerce sur l'aiguille comme sur tout autre corps léger, tantôt à un changement permanent du magnétisme de l'aiguille. Dans les expériences de M. Matteucci [1] sur l'étude des décharges induites au moyen du galvanomètre, le sens de la déviation changeait bien en général avec le sens de la décharge inductrice, mais il partait presque toujours une étincelle dans le circuit et l'état magnétique des aiguilles était plus ou moins modifié. On ne peut donc pas considérer comme démontrée la loi énoncée par M. Matteucci, et d'après laquelle la décharge induite serait toujours de même sens que la décharge inductrice.

Lorsqu'il y avait une interruption et, par suite, une étincelle dans le circuit induit, M. Matteucci n'a presque jamais obtenu de déviation sensible avec son galvanomètre; il a essayé alors de déterminer le sens de la décharge par l'expérience du perce-carte (555), en profitant de la circonstance que le trou est toujours plus rapproché de la pointe négative; ce nouveau procédé d'observation semblait indiquer que la décharge induite était de direction contraire à celle de la décharge inductrice. La méthode du perce-carte n'est pas non plus irréprochable, car si le circuit induit est traversé par deux décharges successives, l'une inverse et l'autre directe, la première décharge perce la carte et la seconde suit le même chemin comme offrant moins de résistance; d'ailleurs, la différence des distances du trou aux deux pointes était souvent difficile à déterminer.

M. Riess a eu recours à une autre méthode [2]. Il admit que le sens de la décharge induite ne doit être en rien modifié par l'état de la partie du circuit non soumise à l'induction, soit que

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. IV, p. 153.
[2] *Pogg. Ann.*, t. LI, p. 351.

ce circuit présente de petites interruptions, soit même qu'il y existe un intervalle trop grand pour livrer passage à l'étincelle. Il approcha les deux extrémités du fil induit des deux plateaux d'un condensateur et détermina ensuite le signe de l'électrisation, ce qui donnait le sens de la décharge.

Cette expérience présentant des difficultés, M. Riess remplaça le condensateur par une plaque de métal recouverte sur les deux faces d'une couche peu épaisse de poix résine, et termina les extrémités du fil induit par des pointes placées en regard de ces deux couches. Pendant la décharge, chacune des pointes laissait écouler de l'électricité sur la face correspondante de la résine et on déterminait le signe de ces couches électriques par le mélange de soufre et de minium qui sert à produire les figures de Lichtenberg. Sur l'une des faces, il se formait une tache centrale rouge entourée comme d'une auréole de filaments jaunes divergents; sur l'autre, c'était un groupe de taches rouges et jaunes environné d'un cercle rouge et presque toujours accompagné d'un petit nombre de filaments jaunes. Ces deux figures s'échangent l'une dans l'autre quand on change la direction de la décharge inductrice; elles présentent toujours les mêmes apparences, quelles que soient l'intensité de la décharge inductrice, la distance du fil induit au fil inducteur, et la conductibilité de l'un ou l'autre circuit. La constance du phénomène ainsi établie, M. Riess avait essayé de déterminer par l'emploi du condensateur le sens de la décharge induite, mais il n'obtint que des résultats contradictoires; il finit par reconnaître plus tard que la décharge induite est un phénomène complexe, et qu'il est impossible de lui assigner une direction unique comme à la décharge inductrice.

M. Knochenhauer (1) a fait passer simultanément la décharge induite et la décharge inductrice dans le fil de platine d'un thermomètre électrique, en disposant les communications, dans deux expériences successives, de manière que l'une des décharges traversât le fil alternativement dans les deux sens opposés, le sens de l'autre décharge y demeurant constant. L'échauffement n'était pas le même dans les deux circonstances, et si l'on admet

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XVII, p. 75.

que la plus grande élévation de température corresponde au cas où les deux décharges traversent le thermomètre dans le même sens, ces expériences indiqueraient que la décharge induite est de direction contraire à celle de la décharge inductrice. L'hypothèse sur laquelle on s'appuie ne paraît pas justifiée. En effet, la quantité de chaleur qui se dégage à chaque instant dans le thermomètre est proportionnelle au carré de l'intensité i du courant, et la chaleur totale à l'intégrale $\int i^2 dt$. Si la décharge induite se compose de deux courants successifs de masses égales, la quantité d'électricité $\int idt$ qui traverse le thermomètre n'est pas modifiée, mais elle ne s'écoule plus pendant le même temps. Il est à remarquer d'ailleurs que, si la première décharge induite est inverse et la seconde directe, l'effet de l'induction sera d'augmenter la durée de la décharge dans le thermomètre et de diminuer l'échauffement, ce qui est d'accord avec les observations de M. Knochenhauer.

616. **Recherches de Verdet.** — Enfin Verdet a résolu la question d'une manière définitive par l'emploi d'un phénomène qui ne donne lieu à aucune équivoque, c'est la décomposition de l'eau par les décharges induites. On ne peut pas songer à produire une décomposition assez abondante pour observer et mesurer les gaz qui se dégagent; mais, quand l'action est trop faible pour que les bulles soient visibles, on peut néanmoins la mettre en évidence par le phénomène connu sous le nom de *polarisation des électrodes*. M. Henrici (1) a montré que si deux fils de platine ou d'or, plongés dans un liquide décomposable, sont traversés par une décharge électrique, puis mis promptement en rapport avec un galvanomètre sensible, on observe un courant plus ou moins intense, qui persiste pendant quelques instants, et dont la direction dans le liquide est toujours contraire à celle de la décharge. L'effet est le même que si ces deux électrodes avaient servi au passage d'un courant voltaïque. Tous les liquides décomposables peuvent être employés pour cette expérience et indiquent des courants de même sens, mais d'intensités plus

(1) *Pogg. Ann.* T. XLVI, p. 585 et XLVII, p. 451.

ou moins grandes; l'iodure de potassium est celui qui convient le mieux, le courant de polarisation est alors 50 ou 60 fois plus intense qu'avec l'eau ordinaire.

Les décharges induites produisent des courants de polarisation très-sensibles. La direction des courants donne celle des décharges, mais il paraît difficile d'obtenir des mesures exactes des intensités, parce que la déviation de l'aiguille dépend de la durée souvent très-courte du courant et qu'elle est modifiée par diverses circonstances. En tout cas, il est évident que les déviations sont croissantes avec la quantité d'électricité qui produit la polarisation; cette remarque suffit pour les conclusions à tirer des expériences.

Verdet produisait les effets d'induction au moyen de couples de spirales plates dont les spires étaient isolées avec le plus grand soin. Le fil de cuivre, enveloppé de quatre couches de soie, était enroulé en spirale sur une pièce d'étoffe de soie et recouvert ensuite d'une couche épaisse de vernis à la gomme laque; puis la spirale bien desséchée était collée sur une feuille de verre également vernie. Les extrémités du fil induit communiquaient avec deux fils de platine plongés dans les branches d'un tube en V rempli d'une dissolution d'iodure de potassium; après la décharge, on supprimait rapidement ces communications et on réunissait les fils de platine au galvanomètre.

Lorsque le circuit induit est entièrement continu, on n'obtient de polarisation sensible que pour les décharges extrêmement fortes; il en résulte que les décharges induites sont sensiblement égales et de signes contraires, ce qui est conforme aux lois établies pour les courants d'induction voltaïque. Cependant il y a, pour de fortes décharges, une faible polarisation qui semble indiquer une prédominance de la décharge induite directe; cela tient sans doute à ce que le courant de polarisation dû à la première décharge inverse augmente un peu l'intensité de la décharge directe qui la suit.

Au contraire, lorsque le circuit induit est interrompu et que la décharge induite traverse la solution de continuité sous forme d'étincelle, la polarisation est en général assez forte et variable d'intensité et de direction, suivant diverses circonstances, en particulier suivant la grandeur de l'étincelle. Pour déterminer

cette influence, Verdet a produit l'interruption entre l'extrémité inférieure d'une vis micrométrique terminée en pointe, et la surface d'une petite masse de mercure placée dans une capsule de verre. La distance des spirales étant constante, si la disposition des appareils est telle que la pointe soit positive pour la décharge induite directe, le galvanomètre indique toujours un courant de polarisation d'intensité croissante avec la distance de la pointe au mercure, et ce courant correspond à une décharge induite directe. Si, au contraire, la pointe est négative pour la décharge directe, la polarisation est irrégulièrement variable de sens et d'intensité tant que la vis est peu éloignée du mercure; à partir d'une certaine distance, le sens de la polarisation est constant, son intensité croissante, et la direction de la décharge induite paraît encore identique à celle de la décharge inductrice.

Les irrégularités disparaissent à peu près complétement si l'on interrompt le circuit en deux points, à l'aide de deux vis micrométriques semblables, de telle manière que la décharge induite doive traverser l'une des interruptions en allant du mercure à la pointe, et l'autre de la pointe au mercure. Dans ces conditions, le sens de la polarisation change toujours avec le sens de la décharge inductrice; l'intensité augmente avec la longueur de l'étincelle auxiliaire, et la décharge induite est toujours de même sens que la décharge inductrice.

Dans tous les cas, l'intensité des courants de polarisation croît avec l'énergie de la décharge inductrice et en sens inverse de la distance des spirales, ce qui était d'ailleurs évident.

Il résulte de là que la décharge induite directe a plus de tension ou, en d'autres termes, s'effectue en un temps plus court que la décharge inverse. La proportion de la décharge induite inverse qui traverse les interruptions établies sur le circuit induit est d'autant plus faible que ces solutions de continuité sont plus grandes; la décharge directe s'affaiblit moins et domine de plus en plus. Avec une seule interruption entre pointe et mercure, il peut arriver pour de petites distances que la plus grande intensité de la décharge directe soit compensée par la propriété que possède la pointe de laisser échapper plus facilement l'électricité positive. Les anomalies observées par différents physiciens s'expliquent ainsi sans difficulté.

617. M. Buff (1) a indiqué une disposition qui permet de faire dominer à volonté la décharge directe ou la décharge inverse. Le fil qui réunit la spirale induite S (fig. 221) aux électrodes f et f' est interrompu entre deux boules c et d; ces électrodes sont ensuite réunies par un pont interrompu entre deux autres boules a et b. Si les boules a et b sont très-écartées l'une de l'autre et les boules c et d rapprochées à une petite distance, on est dans le cas ordinaire et le courant de polarisation indique la prédominance de la décharge directe. Au contraire, si les boules c et d sont en contact et les boules a et b maintenues à une distance convenable, la décharge directe passe entre ces boules et la décharge inverse produit seule la polarisation des électrodes.

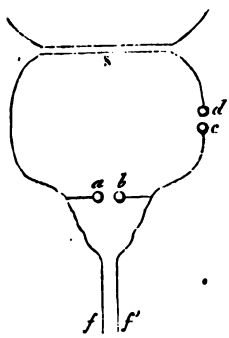


Fig. 221.

618. Pour observer les décharges de second ordre, il suffit de réunir les extrémités de la spirale induite de premier ordre à celles d'une autre spirale placée elle-même en face d'une troisième spirale induite. Verdet a reconnu que la polarisation des électrodes n'est sensible que pour de fortes décharges si le circuit de second ordre est entièrement continu; les quatre décharges induites ont donc une somme nulle. Si l'on interrompt le circuit en deux points, comme précédemment, la polarisation indique toujours une prédominance de la décharge de direction contraire à celle de la décharge influente, quelles que soient même les résistances et les interruptions que l'on établisse dans le circuit de premier ordre. Les quatre décharges de second ordre, d'après les lois de l'induction, sont : la première directe, la seconde et la troisième inverses et la quatrième directe; les deux décharges inverses successives se superposent en partie, et donnent un courant plus intense qui franchit mieux les interruptions.

619. L'emploi des tubes de Holtz à entonnoirs permet de mettre facilement en évidence les décharges induites. On observe même que les étincelles obtenues directement sur la ma-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXXIX, p. 502.

chine de Holtz conviennent mieux que les décharges de batteries, sans doute parce qu'elles permettent d'opérer avec des potentiels beaucoup plus élevés. Un tube de Holtz à deux branches placé sur le fil induit de premier ordre, sans autre interruption, semble toujours indiquer une prédominance de la décharge inverse; cela tient peut-être à ce que cette décharge passe la première et produit dans le tube correspondant un échauffement du gaz qui facilite le passage de la décharge suivante et renverse alors le jeu de la soupape. Dans les circuits de second ordre et surtout dans ceux de troisième ordre, les deux tubes s'illuminent à peu près de la même manière. Nous avons vu d'ailleurs que ces tubes ne remplissent que d'une manière très-imparfaite le rôle de soupapes, de sorte que, s'ils permettent de démontrer facilement le passage des décharges d'induction, ils n'en peuvent pas déterminer la direction avec certitude.

620. **Expériences de M. Bichat.** — En employant les spirales plates et les étincelles de la machine de Holtz, M. Bichat [1] a constaté que la polarisation des électrodes produite par la décharge induite de premier ordre dans un circuit interrompu deux fois entre pointes et mercure, comme dans les expériences de Verdet, ne croît pas régulièrement à mesure que la distance explosive de la décharge inductrice, c'est-à-dire l'énergie de cette décharge, va en augmentant, quoiqu'elle indique toujours une prédominance de la décharge directe. On conçoit, en effet, que le jeu de soupape formé par les interruptions cesse de fonctionner à partir du moment où les décharges induites deviennent assez puissantes ; la polarisation n'est due qu'à la différence des quantités d'électricité qui franchissent les solutions de continuité, et il n'y a pas à s'étonner que l'on puisse observer deux ou trois maxima différents, comme l'indique l'expérience. M. Bichat a reconnu aussi que le courant de polarisation augmente avec la distance des spirales. Ce résultat, évidemment contraire à la manière dont varie l'énergie électrique développée dans le circuit induit, montre bien que les interruptions laissent passer presque également les décharges intenses et sont d'autant plus efficaces que l'induction est plus faible.

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 5e série, t. XI, p. 391.

M. Bichat a obtenu des effets plus énergiques en faisant passer les décharges d'une machine de Holtz dans le fil fin d'une bobine d'induction, et recueillant les décharges induites qui se manifestent dans la bobine à gros fil. Dans ces conditions, la différence de tension des deux décharges induites est énorme et, sans qu'il soit nécessaire d'établir aucune interruption sur le second circuit, on peut produire des effets de polarisation et même décomposer l'eau ou le sulfate de cuivre avec séparation des éléments presque aussi complète que si l'on avait fait usage d'un courant continu. La direction des décharges induites établie par la polarisation des électrodes paraît cette fois inverse de la décharge inductrice.

Pour expliquer ces résultats en apparence contradictoires, M. Bichat fait observer que, si la bobine à fil fin est située dans le circuit de la machine de Holtz avec une interruption entre deux boules d'un excitateur, ce circuit est d'abord traversé par un flux d'électricité relativement assez lent jusqu'à ce que la différence de potentiel des deux boules soit suffisante pour provoquer l'explosion; à ce moment le courant cesse brusquement. La décharge inverse qui correspond au premier état du circuit inducteur a donc une durée notable et produit une polarisation régulière des électrodes, sans dégagement de gaz; la décharge directe qui suit décompose également l'eau, mais brusquement et avec formation de bulles plus grosses qui se dégagent, de sorte qu'il en résulte une polarisation beaucoup plus faible. La production apparente d'un courant continu inverse tient donc uniquement à la différence des intensités ou des durées des deux décharges induites. Le courant de polarisation devient encore plus énergique si l'on profite en même temps de l'induction magnéto-électrique en introduisant dans la bobine un barreau de fer doux ou mieux un faisceau de fils; mais ces considérations nous éloigneraient trop de notre sujet.

621. **Décharges analognes aux extra-courants.** — De même qu'un courant électrique provoque un courant d'induction dans un fil voisin faisant partie d'un autre circuit, de même on peut prévoir qu'un courant agira aussi sur une portion voisine de son propre circuit. Faraday a démontré en effet l'existence de ce nouveau genre de courants d'induction, auxquels il a donné le

nom d'*extra-courants*. Les décharges électriques doivent, par analogie, jouir des mêmes propriétés ; c'est ce que M. Buff a montré par l'expérience suivante.

La décharge est produite entre deux boules B et A (fig. 222), reliées l'une avec le sol et l'autre avec une machine électrique. La communication de la boule B avec le sol a lieu par différents chemins : d'un côté, par une hélice S formée d'un fil de cuivre isolé ayant 4 mètres de longueur et $0^{mm},4$ de diamètre, qui fait 138 tours sur un tube de verre; d'un autre côté, par un fil que l'on peut interrompre entre deux boules *c* et *d*, et un galvanomètre G formé d'un fil d'un mètre de longueur enroulé seulement 30 fois autour du cadre de l'aiguille. D'un fil à l'autre du galvanomètre on a encore jeté un pont conducteur C'D'

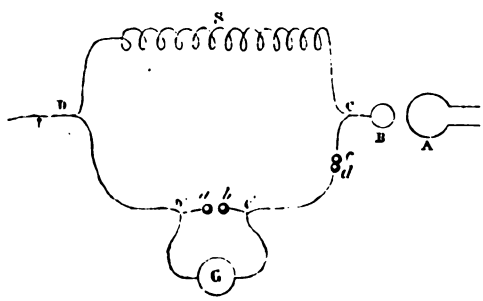


Fig. 222.

nterrompu entre deux boules de métal *a* et *b*. Comme les tours le l'hélice S sont plus nombreux que ceux du galvanomètre et e fil plus long, c'est par l'hélice que l'induction de la décharge ur elle-même produira l'effet dominant.

On supprime d'abord l'hélice S, on écarte les boules *ab*, et l'on amène au contact les boules *cd* et les boules A et B. Dans ce as, la décharge de la machine se fait d'une manière continue et la déviation du galvanomètre est, par exemple, de + 5°.

Sans rien changer à la disposition des boules, on introduit maintenant l'hélice S. Le courant de la machine se bifurque, ne fraction très-faible passe par l'hélice dont la résistance est rès-grande par rapport à celle de l'autre branche, et le galvaomètre indique une déviation plus faible + 4°.

On écarte les boules A et B à une distance de 7^{mm} et on sup-

prime l'hélice. L'aiguille du galvanomètre dévie encore de + 5° d'une manière permanente, bien que le courant soit discontinu. Les étincelles se succèdent assez rapidement pour que l'aiguille reste immobile.

Laissant les boules A et B écartées, on introduit l'hélice S; l'aiguille du galvanomètre se dévie alors de + 11°. Cet accroissement de la déviation tient à l'extra-courant inverse produit dans l'hélice pendant la décharge. En réalité, cet extra-courant est double. Si l'on rapproche les deux boules *ab* jusqu'à ce qu'il s'y produise une étincelle à chacune des décharges, l'extra-courant direct qui a une plus grande force explosive passe en ce point, tandis que l'extra-courant inverse continue de passer par le galvanomètre; on obtient alors une déviation de + 15°.

Enfin, si l'on écarte les boules *cd* par un petit intervalle, l'aiguille du galvanomètre dévie de — 6°. Dans ce cas, la décharge primitive passe toute entière dans l'hélice, et l'extra-courant direct, qui est seul capable de franchir la distance des boules *cd*, produit une déviation de l'aiguille en sens contraire des précédentes.

622. **Énergie des décharges induites.** — Sans se préoccuper de fixer la direction des décharges induites, on peut étudier par l'interposition d'un thermomètre électrique la quantité de chaleur dégagée dans le circuit induit, c'est-à-dire l'énergie du phénomène électrique qui s'y manifeste. M. Riess (1) a déterminé l'influence exercée sur ce dégagement de chaleur par diverses circonstances en provoquant l'induction, soit entre des fils rectilignes et parallèles, soit entre deux bobines concentriques ou des spirales plates et parallèles. Il a reconnu que la quantité de chaleur dégagée dans le thermomètre du fil induit est proportionnelle à l'énergie de la décharge inductrice, à la longueur du fil induit soumis à l'influence, et indépendante du diamètre du fil induit, pourvu que les distances des axes du fil induit et du fil inducteur voisin reste constante.

En opérant avec des fils rectilignes, il a constaté que l'énergie de la décharge induite est en raison inverse de la distance des fils, tant que cette distance n'est pas trop faible. Avec des spi-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. LXXIV, p. 158.

rales que l'on écarte de plus en plus, la quantité de chaleur dégagée augmente plus rapidement d'abord que l'inverse de la distance, puis elle varie d'une manière plus lente. La loi du phénomène est ici un peu compliquée, parce que ce n'est qu'à partir d'un écartement relativement très-grand que la distance de deux éléments quelconques varie sensiblement comme la distance des spirales; et alors les phénomènes d'induction deviennent trop faibles pour être observés.

Comme la charge de la batterie ne correspond qu'à une quantité d'énergie limitée, on conçoit aisément que l'on ne pourra en tirer aussi qu'une somme d'effets limitée, quelles que soient les dispositions des appareils, et que tout accroissement de chaleur en un point quelconque doit correspondre à une diminution de la chaleur dégagée dans les autres parties. Cette remarque, qui n'est autre que le principe de la conservation de l'énergie, permet d'expliquer quelques résultats observés encore par M. Riess.

Ainsi, lorsque le fil conjonctif de la batterie fait naître des décharges induites dans deux circuits différents, la quantité de chaleur dégagée dans chacun d'eux est moindre que si l'autre n'existait pas. De même, quand on interpose un disque de métal entre la spirale inductrice et la spirale induite, la chaleur dégagée dans le fil induit n'est pas modifiée d'une manière sensible si le disque est épais; mais, si l'on emploie des lames d'étain, la quantité de chaleur est diminuée d'autant plus que l'épaisseur de la lame est plus faible, c'est-à-dire que cette lame est moins conductrice. Dans ce cas, la lame est elle-même le siége d'une décharge induite sensible et elle s'échauffe aux dépens de la spirale voisine, ce qui rentre dans le cas précédent.

823. **Réactions sur le circuit principal.** — Si tous les conducteurs assez rapprochés pour agir les uns sur les autres sont traversés par la décharge principale, il peut sans doute s'y produire des phénomènes d'induction dus à l'influence du circuit sur lui-même et analogues aux extra-courants, mais la quantité totale de chaleur dégagée ne doit pas changer, parce qu'il n'y aurait aucune compensation correspondante.

Toutefois, la distribution de cette chaleur peut être modifiée et se faire suivant une loi toute différente de celle qui a été éta-

blie plus haut (413). Ainsi M. Riess (1) a fait passer la décharge d'une batterie à travers deux spirales que l'on pouvait rapprocher l'une de l'autre ou tenir écartées, en disposant les communications de telle manière que les courants dans les deux spirales fussent tantôt de même sens et tantôt de sens contraires. L'échauffement d'un thermomètre électrique placé sur le trajet du circuit était *maximum* quand les spirales étaient rapprochées et parcourues en sens contraires, *minimum* lorsqu'elles étaient parcourues dans le même sens, et prenait des valeurs intermédiaires quand on éloignait les spirales l'une de l'autre. La première disposition produit donc le même effet qu'une diminution dans la résistance des spirales, et la seconde équivaut à un accroissement de résistance. Ces résultats démontrent l'inégale répartition de la chaleur dans l'ensemble du circuit; l'intensité du courant de la décharge, c'est-à-dire l'inverse de la durée, est augmentée lorsque deux fils parallèles faisant partie du circuit sont parcourus en sens contraires, et diminuée lorsque ces fils parallèles sont parcourus dans le même sens. La même propriété se vérifie aussi pour deux décharges induites qui se propagent dans des fils parallèles. Nous avons déjà signalé des effets analogues à propos des expériences de M. Feddersen (451).

824. Guillemin (2) a publié plusieurs observations intéressantes qui conduisent aux mêmes conséquences. On fait passer la décharge d'une batterie par un faisceau de fils de cuivre parallèles tendus entre deux barres de métal, et l'on interpose dans le circuit un fil de fer de longueur suffisante pour qu'il soit rougi sans être fondu. On réunit alors tous les fils de cuivre en un seul faisceau en les liant avec des cordons de soie. Après cette modification, si l'on fait passer dans le même circuit une décharge de batterie identique à la première, le fil de fer tombe immédiatement en fusion. Les décharges parallèles dans les fils voisins ralentissent donc la décharge principale, comme un accroissement de résistance, et y provoquent un plus grand échauffement, ce qui diminue la quantité de chaleur dégagée en d'autres points du circuit. Guillemin dispose ensuite trois fils paral-

(1) *Reibungselektricität*, Bd. II, p. 312.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XXVII, p. 518.

lèles, séparés par une distance de 50 centimètres, et termine les deux extrêmes par des fils de fer fin de 8 centimètres de longueur. Quand le fil du milieu est à égale distance des deux autres et qu'on les fait traverser par une décharge qui se partage entre eux par dérivation, le fer s'échauffe également des deux côtés; quand le fil intermédiaire est inégalement éloigné des fils extrêmes, le fil de fer le plus voisin s'échauffe beaucoup moins. On voit ici encore que deux décharges électriques parallèles se nuisent ou se ralentissent quand elles ont la même direction, tandis que des décharges parallèles et de sens contraires s'accélèrent réciproquement.

825. Les changements sont encore plus marqués si une partie des conducteurs ne fait pas partie du circuit principal; tout dégagement de chaleur dû à l'induction doit être accompagné d'une diminution de chaleur dans le circuit de la batterie et d'un accroissement correspondant dans la durée de la décharge. En effet, si l'on place en face d'une spirale inductrice soit un disque conducteur très-épais, soit une autre spirale induite dont les extrémités restent libres ou sont réunies par un fil très-conducteur, l'énergie de la décharge inductrice n'est pas sensiblement modifiée; mais, si le disque est très-mince ou si la spirale induite est fermée par un fil de métal long et fin, l'échauffement produit, par une décharge déterminée, sur un thermomètre situé dans le circuit principal, est d'autant plus faible que le circuit induit offre une plus grande résistance, c'est-à-dire s'échauffe lui-même davantage. D'après le principe de la conservation de l'énergie, on peut même affirmer que, si la décharge ne produit aucun travail mécanique, la somme totale des quantités de chaleur dégagées sur le circuit principal et sur les circuits induits de tout ordre doit être constante et équivalente à l'énergie électrique accumulée sur la batterie.

Des expériences récentes de M. Riess (1) sont une confirmation de cette loi. L'induction était produite entre deux spirales; deux thermomètres électriques étaient placés, l'un dans le circuit inducteur, l'autre dans le circuit induit, et l'on pouvait intercaler

(1) *Pogg. Ann.*, t. CXLIII, p. 195. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XXVIII, p. 565.

dans ce second circuit une longueur variable d'un fil de platine de $\frac{1}{8}$ de millimètre de diamètre. Le tableau suivant indique la manière dont variait l'échauffement des deux thermomètres.

LONGUEUR DU FIL DE PLATINE INTERCALÉ DANS LE CIRCUIT INDUIT	ÉCHAUFFEMENT DES THERMOMÈTRES	
	CIRCUIT PRINCIPAL	CIRCUIT INDUIT
mètres.		
0	100	100
1	76	71
2	67	55
4	62	34
8	67	18
16	74	7,9
32	91	2,6
64	104	»
Circuit ouvert.	144	0

La chaleur dégagée dans le circuit principal diminue d'abord à mesure que la résistance de l'autre circuit va en augmentant, pour reprendre ensuite une marche ascendante. Ces expériences montrent bien quel est le sens du phénomène, mais elles ne permettent pas de vérifier si l'échauffement minimum du premier circuit correspond exactement au maximum de chaleur dégagée dans le second; il faudrait pour cela tenir compte de la chaleur absorbée par le fil additionnel lui-même.

CHAPITRE XIII

DES MACHINES ÉLECTRIQUES

MACHINES A FROTTEMENT.

826. **Aperçu historique.** — Une machine électrique se compose essentiellement de deux corps qu'on électrise en les frottant, et de conducteurs de dimensions variables sur lesquels on recueille l'une ou l'autre des deux électricités développées par le frottement, ou même quelquefois les deux électricités séparément. D'après cette définition, le globe de soufre d'Otto de Guéricke (3), ni les appareils si ingénieux construits par Hauksbée (4) pour faire tourner rapidement des cylindres ou des globes de verre, et avec lesquels on obtenait de grandes quantités d'électricité, ne doivent cependant pas être considérés comme de véritables machines électriques, parce qu'on se bornait alors à utiliser les corps frottés eux-mêmes pour répéter les différentes expériences, ce qui en rendait l'usage fort incommode. On comprend donc que les électriciens aient abandonné les machines d'Hauksbée, auxquelles il restait si peu de chose à ajouter, et se soient bornés pendant longtemps encore à l'emploi des tubes de verre frottés à la main.

827. Bose (1) revint à l'emploi des globes de verre, et il imagina d'y ajouter un conducteur formé d'un cylindre de fer blanc sur lequel l'électricité du globe frotté s'échappait sous forme d'étincelles; il reconnut aussi qu'il était avantageux de terminer le cylindre à l'extrémité la plus voisine du globe par un paquet de

(1) *Die Electricität nach ihrer Entdeckung und Fortgang*, etc. Wittenberg-1744.

fils qui facilitaient singulièrement le passage de l'électricité. Ce cylindre fut d'abord soutenu par un homme placé sur un tabouret isolant, puis on le suspendit à des cordons de soie. C'est de là que date véritablement l'invention des machines électriques ; Bose reconnut même que si la machine et l'homme qui la met en action sont aussi isolés, ils donnent également des signes d'électricité. L'usage du globe et du conducteur fut aussitôt généralement adopté. Winckler [1] eut l'idée de substituer un coussin de laine à la main que l'on avait employée auparavant pour frotter le globe, mais la main bien sèche fut encore considérée pendant plusieurs années comme le moyen le plus efficace d'électriser le verre.

La machine électrique de l'abbé Nollet se composait d'un globe de verre animé d'un mouvement rapide de rotation à l'aide d'une grande roue et d'une corde de renvoi, et un observateur maintenait les deux mains sur le globe. L'électricité était recueillie par des conducteurs métalliques suspendus à des cordons de soie, dont l'un se terminait à une distance du globe assez petite pour que l'intervalle fût franchi par des étincelles. Souvent même ce premier conducteur était terminé par une chaîne qui pendait sur le globe et rendait ainsi la communication d'électricité plus facile.

Pour obtenir des quantités d'électricité plus grandes, Watson [2] fit construire une machine dans laquelle quatre globes de verre, portés entre deux montants en bois et frottant sur des coussins séparés, étaient mis en mouvement par une grande roue et quatre cordons distincts. Un conducteur isolé était terminé par des bandes d'étoffe qui touchaient tous les globes et en récoltaient l'électricité.

828. Ces machines à globe prirent des formes très-variées ; on chercha d'abord à augmenter la vitesse de rotation par l'emploi de cordes de transmission ou même de roues dentées ; mais on ne tarda pas à reconnaître que les appareils supportaient mal des rotations très rapides et qu'il y avait surtout avantage à augmenter les surfaces de frottement. Les travaux de Franklin sur

[1] *Gedanken von den Eigenschaften,... nebst Beschreibung zweyer neuen electrischen Maschinen* (Leipzig-1744).

[2] Priestley, t. III, p. 84.

les propriétés des pointes donnèrent en outre le moyen de faire passer l'électricité du corps frotté aux conducteurs sans établir le contact. Wilson décrivit en 1752 (1) une machine électrique composée d'un cylindre de verre horizontal de 12 pouces de longueur (30 centimètres) et de 5 pouces de diamètre, frottant sur un long coussin placé en-dessous et mis en mouvement rapide par une grande roue et une corde. Le conducteur était un cylindre de métal terminé en boules à ses extrémités et soutenu par des cordons de soie ; une tige verticale attachée à ce conducteur descendait jusqu'auprès du cylindre de verre où elle se terminait par un peigne métallique. Enfin le coussin était en cuir, recouvert de feuilles métalliques d'or, d'argent ou de cuivre, et appuyé par des ressorts sur la surface du cylindre. A partir de cette époque, la machine électrique est donc munie de tous ses organes essentiels, et les modifications ne doivent plus porter que sur des détails de construction.

La machine électrique de Cavallo (2) est aussi formée d'un cylindre de verre. Le conducteur est porté par des pieds en verre revêtus de cire d'Espagne; le coussin est recouvert d'une feuille d'étain, d'amalgame d'étain (Canton) ou de zinc (Higgins), ou simplement d'or mussif; enfin le coussin est muni d'une large bande de taffetas huilé qui s'applique sur toute la partie supérieure du cylindre et empêche l'électricité développée par frottement de s'échapper dans l'air avant d'être parvenue en face des pointes du conducteur.

La machine célèbre construite par Nairne en 1773 (3) ne différait de la précédente que par l'addition d'un nouveau conducteur isolé par lequel était porté le coussin. De cette façon, on pouvait recueillir en même temps l'électricité négative du coussin et l'électricité positive du conducteur à peigne, ou simplement l'une quelconque des deux électricités, en isolant le conducteur correspondant et mettant l'autre conducteur en communication avec le sol. Le cylindre de la machine de Nairne avait 12 pouces de diamètre et 19 pouces de longueur (48 centimètres) ; les frotteurs, 14 pouces de longueur sur 5 de largeur; on obtenait entre

(1) *A Treatise on electricity*, London.
(2) *Traité d'électricité*, p. 125.
(3) *Phil. trans. abridg.*, vol. XIII, p. 498 (1774).

les deux conducteurs des étincelles de 12, et même quelquefois de 14 pouces de longueur (35 centimètres).

829. Différents physiciens paraissent avoir eu, à la même époque, l'idée de remplacer les globes et les cylindres de verre par des plateaux de verre tournant autour d'un axe horizontal et frottant contre des coussins fixes. Sigaud de la Fond [1] dit avoir construit dès 1756 une petite machine avec un plateau de cristal qui était frotté sur l'une des faces par un coussin; mais, n'ayant pas songé à faire passer le verre entre deux coussins situés de part et d'autre, il ne tarda pas à briser son plateau. Ingenhouz [2] employa vers 1764 une machine semblable dont le plateau avait 15 pouces de diamètre. Jusque là les boules, les cylindres ou les plateaux étaient animés d'un mouvement de rotation rapide; quand les appareils acquirent de grandes dimensions, il devint dangereux de leur donner de pareilles vitesses et l'on se borna à les faire tourner directement par une manivelle. Le Roy [3] fit construire une machine formée d'un plateau mû à la main et frottant contre une seule paire de coussins. Les conducteurs étaient deux cylindres horizontaux placés en face des extrémités du diamètre horizontal du plateau ; l'un des cylindres portait le double coussin qui embrassait le plateau, et l'autre se terminait à une petite distance de la surface du verre. Ces deux conducteurs se chargeaient ainsi d'électricités contraires, comme dans la machine de Nairne.

Peu de temps après, Cuthbertson fit une machine avec deux plateaux de verre de 31 pouces (près de 80 centimètres) de diamètre, dont chacun tournait entre deux paires de coussins placés en haut et en bas. L'appareil était placé sur une table à pieds de verre et les coussins communiquaient avec un grand conducteur de cuivre, qui se chargeait ainsi d'électricité négative. Entre les deux plateaux et aux deux extrémités du diamètre horizontal se trouvait un double peigne que l'on mettait en communication avec le sol. C'est avec une machine de ce genre à peignes isolés, construite aussi par Cuthbertson, que Van Marum fit la plupart de ses belles expériences d'électricité. Enfin, la forme actuelle

(1) *Précis des phénomènes électriques*, 2e édition, p. 47.
(2) *Phil. trans. abridged*, vol. XIV, p. 598 (1779).
(3) *Mémoire de l'Academie* (1772), Ire partie, p. 499.

des machines électriques à frottement, où les coussins sont en communication permanente avec le sol et les conducteurs terminés par deux peignes contournés en mâchoire autour du plateau, paraît due à Ramsden.

Une forme un peu différente fut encore imaginée plus tard par Van Marum (1). Le plateau était porté à l'extrémité d'un axe horizontal et tournait entre deux paires de coussins montés latéralement sur des pieds isolants. Une disposition sur laquelle nous reviendrons, permettait encore de recueillir à volonté l'une ou l'autre des deux électricités.

830. On conçoit d'ailleurs que tout corps capable d'être électrisé par frottement puisse servir à la construction d'une machine électrique; tels sont, par exemple, le bois, les résines, le taffetas, les étoffes de laine et de soie, le caoutchouc, etc. On a fait avec ces diverses substances des machines dont l'usage ne s'est pas répandu, mais dont quelques-unes étaient assez curieuses. Sigaud de la Fond décrit, par exemple, une grande machine que de Walckiers fit construire à Paris en 1784 et qui causa l'admiration des physiciens par la puissance des étincelles et la quantité d'électricité qu'elle produisait. Elle était formée essentiellement par une bande de taffetas sans fin, enduit de matière huileuse, enroulée sur deux cylindres de bois horizontaux dont l'un recevait d'une manivelle un mouvement de rotation. Cette bande tournait ainsi d'une manière continue et, en quittant chaque cylindre, elle s'électrisait en frottant sur une peau de chat portée par une lame de métal. A égale distance des rouleaux et entre les deux bandes de taffetas était placé un conducteur cylindrique, muni de pointes ou de lames de métal saillantes qui recueillaient l'électricité développée sur l'étoffe par le frottement. Des machines de cette nature étaient trop défectueuses pour devenir autre chose qu'un objet de curiosité et nous nous bornons à en signaler l'existence. On pourra trouver dans l'ouvrage de F. Saxtorph (2) des renseignements détaillés et généralement très-exacts sur les principales machines électriques du siècle dernier.

(1) *Deuxième continuation des expériences*, etc. (Harlem — 1797).

(2) *Darstellung der gesammten, auf Erfahrung und Versuche gegründeten Electricitätslehre.* Traduction allemande par B. Fangel. Kopenhagen — 1803.

Nous remarquerons seulement, comme conclusion de cette revue rapide, que la découverte des machines électriques à frottement n'appartient en réalité à personne; les progrès dans la construction de ces appareils se sont développés peu à peu, et toutes les modifications ont été successivement essayées. C'est avec cette restriction que l'on peut conserver encore, pour abréger le langage, les noms de Ramsden, de Nairne, de Van Marum, etc., afin de désigner une disposition particulière donnée aux différents organes d'une machine électrique. Nous allons maintenant examiner d'une manière plus complète la construction et les propriétés de ces appareils, en prenant pour type la machine dite de Ramsden, et nous pourrons ensuite passer rapidement sur la description des autres modèles.

831. **Machine de Ramsden.** — Toute machine à frottement comprend trois parties essentielles : le *corps frotté*, les *coussins* et les *conducteurs*. Dans la machine de Ramsden, le corps frotté est un plateau de verre P (fig. 223) que l'on fait tourner autour d'un axe horizontal, soit d'une manière rapide à l'aide d'une corde de transmission, soit, pour les plateaux de grandes dimensions, par une manivelle qui commande directement l'axe de rotation. Le choix du verre a une grande influence et l'on doit rechercher surtout ceux dont la conductibilité superficielle est la plus faible. A cet égard, les glaces de fabrication ancienne paraissent avoir une supériorité marquée qu'elles doivent sans doute à une proportion moindre d'alcalis. Les glaces récentes s'améliorent d'ailleurs par l'usage.

On a cherché souvent, soit à remplacer les plateaux de verre, soit à les recouvrir de substances isolantes capables de produire plus d'électricité, mais tous les essais que l'on a tentés dans cette direction ont été successivement abandonnés. Ainsi, des plateaux de soufre ou des enduits de soufre et de résine réussissent très-bien quand ils sont récemment préparés, mais il se produit bientôt des gerçures et des fentes qui en font perdre tous les avantages. De même, les plateaux de caoutchouc durci (ébonite) joignent à la propriété d'être moins fragiles celle de fournir une très-grande quantité d'électricité; mais ces plateaux éprouvent des déformations, surtout quand on les chauffe, et subissent au bout de quelque temps une altération chimique superficielle qui

affaiblit les effets électriques dans une grande proportion; il est nécessaire de renouveler assez souvent les surfaces en les lavant avec une dissolution de potasse ou mieux en les frottant avec du papier d'émeri. Le verre est de toutes les substances celle qui conserve le mieux ses propriétés; il est seulement utile de temps en temps de le nettoyer avec de l'alcool ou une essence pour enlever toutes les matières que le frottement des coussins

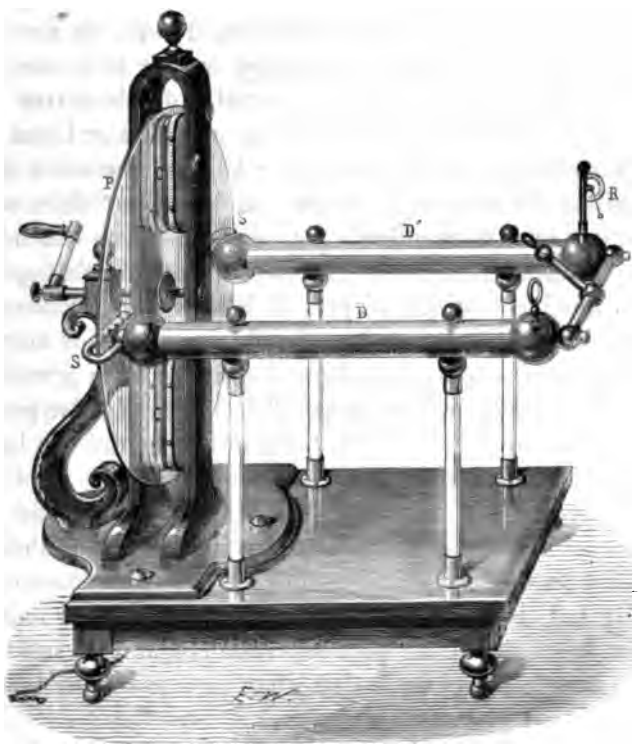


Fig. 225.

y aurait laissées, et il y a quelquefois avantage à enduire la surface d'une couche de graisse extrêmement faible.

832. Les frottoirs sont formés par quatre coussins CC', en cuir rembourré de crin, portés par deux montants en bois situés de part et d'autre du plateau. Ces coussins sont appliqués sur le verre par des ressorts, de sorte que si le plateau n'est pas absolument plan ni perpendiculaire à l'axe de rotation, les petits déplacements qu'il éprouve ne risquent pas de le briser. On n'a

pas tardé à reconnaître qu'il était avantageux de couvrir le coussin de substances métalliques. Van Marum garnissait les coussins d'une bande de taffetas ciré recouverte de feuilles d'étain ; mais les feuilles de métal, étain, or, argent ou cuivre, se déchirent trop facilement ou sont trop dures, ce qui produit des rayures sur le verre. Les poussières métalliques que l'on obtient en pulvérisant certains amalgames peuvent être étalées sur le cuir en couche continue et ne présentent pas les mêmes inconvénients. On emploie généralement des amalgames d'étain, de zinc et de bismuth. Un grand nombre de recettes ont été proposées pour ces amalgames; le plus employé est celui de Kienmayer composé de 2 parties de mercure, 1 de zinc et 1 d'étain. L'état physique du mélange paraît jouer un rôle plus important que la composition elle-même : il faut que l'amalgame se réduise en une poudre très-fine, de manière à pouvoir former une couche uniforme parfaitement adhérente. Tel est, par exemple, l'alliage très-cassant que l'on obtient, d'après M. Böttger (1), en fondant un mélange bien homogène de 2 parties de zinc et de 1 de mercure. L'efficacité des métaux s'explique d'ailleurs par la grande tendance qu'ont ces corps à se charger d'électricité négative par frottement, et les recherches de M. Gaugain ont montré que le mercure, le bismuth, l'étain et le zinc jouissent au plus haut degré de cette propriété. L'or mussif (bisulfure d'étain) donne à peu près les mêmes effets, et si quelquefois il ne semble pas réussir, cela tient presque toujours, comme l'a remarqué Masson, à ce que l'or mussif du commerce renferme encore une grande proportion du sel ammoniac qui a servi à le préparer; il suffit de le laver à grande eau et de le dessécher avec soin pour lui restituer toutes ses propriétés électriques.

Quel que soit le mélange adopté, on peut préparer les coussins comme l'indique Masson. L'amalgame (ou l'or mussif) est d'abord pulvérisé très-finement, puis chauffé et étalé sur des feuilles de papier chaud afin d'enlever les moindres traces d'humidité. Les coussins sont chauffés puis recouverts d'une petite quantité de suif, et on les frotte l'un contre l'autre pendant longtemps jusqu'à ce qu'il n'y reste plus qu'une couche de matière

(1) *Pogg. Ann.*, t. CXXXVII, p. 175. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XVIII, p. 445.

grasse extrêmement faible et parfaitement continue; on les applique alors sur l'amalgame, puis on les frotte de nouveau et on répète cette opération jusqu'à ce qu'ils aient pris un aspect uniformément métallique, sans aucun dépôt irrégulier d'amalgame. L'addition d'une petite quantité d'or mussif contribue encore à rendre les surfaces plus lisses et plus onctueuses. On peut aussi recouvrir les coussins d'une bande de taffetas comme le faisait Van Marum et y appliquer la couche d'amalgame; les inégalités du tissu retiennent la couche métallique plus facilement que la surface polie du cuir, et les coussins se conservent plus longtemps en bon état.

Les coussins ainsi métallisés sont mis en communication conductrice avec des baguettes de cuivre encastrées dans les montants en bois; ces baguettes se terminent à la partie inférieure par un bouton de métal, auquel on attache une chaîne qu'on laisse traîner sur le sol. Si la table de la machine repose sur un sol peu conducteur, comme un dallage en marbre, un plancher ciré et surtout une couche d'asphalte, il est nécessaire de relier cette chaîne avec des corps qui communiquent avec le sol d'une manière plus parfaite, tels que les tuyaux de distribution du gaz ou les conduites d'eau.

Enfin, comme les conducteurs destinés à recueillir l'électricité du plateau aboutissent aux extrémités du diamètre horizontal, il en résulte que les points du verre frottés par les coussins ne parviennent en face des conducteurs qu'après un quart de révolution du plateau; pour diminuer la déperdition que ces quadrants électrisés éprouvent par le contact de l'air, on les entoure habituellement de deux bandes de taffetas montées sur un cadre qui s'attache aux coussins.

835. Le conducteur est formé le plus souvent de deux cylindres D D′ de laiton creux, terminés par des boules sphériques, réunis à leurs extrémités éloignées par une traverse en cuivre, et portés par des pieds en verre verni à la gomme laque. Ces cylindres ne doivent présenter aucune forme anguleuse : les garnitures des pieds, les vis d'attache et toutes les pièces terminales sont arrondies en sphères ou en anneaux pour éviter le plus possible la déperdition. En principe, il y a tout avantage à augmenter la surface et les dimensions du conducteur, pour accroître

la capacité électrique et rendre les étincelles plus puissantes; mais, en pratique, outre que les appareils deviennent encombrants, on est bientôt arrêté parce que les déperditions qui ont lieu par l'air et par les supports ne tardent pas à équilibrer le débit de la machine; il faut donc garder une certaine proportion entre les dimensions du conducteur et celles du plateau. Pour ralentir ces déperditions, il est bon d'essuyer les pieds de verre avec un linge sec et chaud, de les enduire d'une légère couche de suif et même, par les temps humides, de placer un fourneau à charbon de bois sur la table. Un électromètre à cadran de Henley E sert à indiquer l'état électrique de l'appareil. Aux extrémités voisines du plateau, les conducteurs sont terminés par des machoires métalliques S et S', qui embrassent la lame de verre sur une longueur à peu près égale à celle des coussins, et qui sont munies à l'intérieur d'un certain nombre de pointes pour faciliter les communications électriques.

Quand on tourne le plateau d'un mouvement uniforme, les conducteurs se chargent peu à peu d'électricité positive et prennent un potentiel croissant, comme le montre la divergence du pendule; mais il arrive bientôt un moment où le pendule reste stationnaire, et, si la machine est en bon état, on voit alors des aigrettes qui s'échappent des différents points des conducteurs et même des étincelles curvilignes qui éclatent entre les coussins et les mâchoires en léchant la surface du verre. Si l'on établit une communication entre les conducteurs de la machine et d'autres corps convenablement isolés, on voit encore la divergence du pendule augmenter, mais d'une manière plus ou moins lente suivant la capacité du nouveau conducteur, et se maintenir au même point que précédemment. La machine, au moins quand elle est animée d'un mouvement uniforme, se comporte donc comme une *source* que l'on peut définir par la quantité d'électricité qu'elle débite pendant l'unité de temps, et par le potentiel maximum qu'elle peut établir sur un conducteur.

834. **Théorie des machines à frottement.** — Nous pouvons maintenant examiner de plus près la théorie de cet appareil, et préciser davantage le mécanisme de la production de l'électricité. Pour cela nous admettrons d'abord (et ce principe sera démontré soit par des expériences directes, soit par la vérification des con-

séquences qu'on en déduit) que, lorsque deux corps sont frottés l'un contre l'autre, en particulier le coussin et le plateau d'une machine, il s'établit entre eux une différence de potentiel indépendante de l'étendue des surfaces en contact, de la vitesse relative et de la pression des deux corps, la pression devant d'ailleurs être assez grande pour que le contact des surfaces soit assuré et la vitesse n'étant pas très-petite. Quand l'un des corps est mauvais conducteur, le potentiel n'est pas constant en ses différents points et il est difficile de préciser comment on doit appliquer le principe; mais, pour les plateaux de machine dont les deux surfaces sont frottées dans les mêmes conditions, il se produit de part et d'autre des couches d'électricité identiques, de sorte que le potentiel dans l'intérieur du verre, à une distance des surfaces plus grande que l'épaisseur des couches électriques, est sensiblement constant, et le même que si la substance était conductrice.

Remarquons que la différence des potentiels du verre et des coussins peut être très-faible et correspondre néanmoins à une charge considérable, parce que les deux couches d'électricités égales et de signes contraires répandues sur les deux surfaces en contact sont très-rapprochées l'une de l'autre, comme elles le seraient dans un condensateur à lame isolante infiniment mince; mais les portions du plateau qui quittent les coussins n'emportent que l'électricité positive, elles acquièrent rapidement un potentiel énorme par rapport à la différence primitive, et arrivent alors en face des conducteurs. Supposons maintenant que les mâchoires soient munies de pointes assez nombreuses et assez rapprochées de la surface du verre pour que l'électricité s'écoule sous l'influence de la moindre différence de potentiel, les portions du verre qui passent entre les branches de la machine sont comme placées dans l'intérieur d'un conducteur avec lequel une communication serait établie, et perdent toute leur électricité. En retournant ensuite aux coussins qui sont restés en communication avec le sol, elles se chargent de nouveau de la même manière.

Si l'électricité est dépensée à mesure de sa production, on voit, d'après cela, que le débit doit être proportionnel à la surface frottée, indépendant de la largeur des coussins et de la pression

qu'ils exercent sur le plateau, pourvu que tous les points du verre soient touchés, et proportionnel à la vitesse de rotation. Pour s'en assurer, il suffit de mettre les conducteurs en communication avec le sol par l'intermédiaire d'une bouteille de Lane; on vérifie aisément qu'il se produit un nombre constant de décharges pour un même nombre de tours de plateau, quelle que soit la vitesse de rotation, que ce nombre de décharges diminue de moitié quand on enlève une paire de coussins, et qu'à partir d'une certaine pression, on ne gagne plus rien en serrant davantage les ressorts des frotteurs.

Si le conducteur de la machine reste isolé, il semble que la charge électrique doive augmenter sans limite, puisque le jeu des mâchoires est indépendant du potentiel qu'elles ont déjà atteint; mais, en supposant même qu'il n'y ait aucune cause de déperdition par l'air ou les supports, le potentiel du conducteur ne s'élèvera que jusqu'au moment où des étincelles pourront éclater directement entre les mâchoires et les coussins; ces étincelles sont d'ailleurs favorisées par la présence de la lame de verre et son état électrique, car elles en longent la surface sous la forme de traits de feu circulaires.

835. Pour simplifier les explications, nous avons supposé que les mâchoires étaient armées de pointes absolument efficaces; l'expérience indique, au contraire, que ces pointes sont à peu près inutiles, et il est facile d'en concevoir la raison. Si la distance des branches de la mâchoire au plateau est assez faible pour qu'il s'y produise des étincelles, ces étincelles joueront le même rôle qu'une communication conductrice discontinue; le plateau sera encore ramené au même potentiel que le conducteur et perdra sensiblement toute son électricité. Les mâchoires elles-mêmes ne sont pas nécessaires; dans beaucoup de machines, les conducteurs sont terminés simplement par un petit cylindre à bouts arrondis placé en regard d'une des faces seulement du plateau, bien que le frottement des coussins ait lieu des deux côtés, et cette disposition ne semble pas diminuer le débit d'une manière appréciable. Pour comprendre ce résultat, il faut remarquer que les portions du plateau qui reçoivent directement les étincelles sont ramenées au même potentiel que le conducteur; comme la face opposée reste

chargée d'une grande quantité d'électricité positive, il est nécessaire que les étincelles aient déposé sur la première face une couche d'électricité contraire qui en diffère peu, de sorte que finalement la quantité d'électricité négative versée par le conducteur sur le plateau du verre reste à peu près la même qu'avec une mâchoire. Dans ce cas, les deux faces du plateau sont électrisées de manières différentes quand elles s'éloignent des conducteurs, mais un nouveau frottement sur les coussins les rétablit dans l'état primitif.

836. Lorsque les coussins sont maintenus en communication permanente avec le sol, comme nous l'avons recommandé, on perd l'électricité négative dégagée par le frottement; dès le début des machines électriques, plusieurs physiciens (Winckler, Le Roy, Nairne, etc.) ont cherché à récolter les deux électricités à la fois, ou l'une des deux à volonté, mais on s'est fait souvent illusion sur les avantages que présente cette disposition.

Si les coussins, au lieu d'être reliés avec le sol, sont déjà électrisés, le plateau qui passe entre eux se trouve, par sa position même, porté au potentiel des coussins; le frottement établit ensuite entre ces deux corps une différence de potentiel déterminée, d'après le principe que nous avons établi, et cette différence de potentiel correspond à une production d'électricité constante : le débit d'électricité recueilli par les mâchoires sera donc le même que si les coussins n'étaient pas isolés. Il est vrai que les conducteurs reliés aux coussins recevront une quantité égale d'électricité contraire, mais sans grand profit. En effet, si l'on veut charger une batterie, par exemple, il est indifférent de mettre l'armature intérieure seulement en communication avec une source qui donne de l'électricité positive, l'armature extérieure n'étant pas isolée, ou bien d'isoler aussi cette seconde armature et de la relier avec une autre source qui fournit un débit égal d'électricité négative.

Il en est de même pour la charge maximum ou le potentiel limite, car les appareils cessent de fonctionner utilement, dans les deux cas, à partir du moment où des étincelles peuvent éclater entre les mâchoires et les coussins; cette limite sera atteinte aussitôt que la différence des potentiels des deux conducteurs aura acquis une valeur déterminée. On voit même que

si les deux systèmes de conducteurs, celui des coussins et celui des machoires, ont des capacités électriques égales, chacun d'eux prendra un potentiel moitié moindre en valeur absolue que s'il eût été seul isolé; il faudra donc relier l'un de ces systèmes de conducteurs avec le sol, quand on voudra utiliser seulement une espèce d'électricité, pour obtenir sur l'autre le potentiel le plus élevé possible en valeur absolue. L'isolement des coussins présente cependant un avantage réel. Pour provoquer des étincelles à grande distance avec une machine ordinaire, il faut approcher du conducteur un autre corps communiquant avec le sol; le potentiel absolu de la machine est alors très-élevé et les déperditions très-rapides. Si les coussins sont isolés, on fera éclater les étincelles entre les deux systèmes de conducteurs, dont chacun aura un potentiel beaucoup moindre en valeur absolue, l'un positif et l'autre négatif, ce qui diminuera beaucoup les déperditions accidentelles.

Cette manière de concevoir le mécanisme électrique des machines à frottement montre que ce sont de véritables *sources* d'électricité, c'est-à-dire des appareils qui permettent d'établir entre deux conducteurs une différence de potentiel limitée. Le *débit* d'électricité, qui dépend d'ailleurs de la nature des corps entre lesquels le frottement a lieu, est proportionnel à l'étendue des surfaces frottées. Quant à la *différence maximum des potentiels*, elle ne dépend que de la distance minimum des deux conducteurs considérés, laquelle est limitée par la distance du frotteur et des mâchoires.

Après avoir établi ces principes, il nous suffira d'ajouter quelques mots pour indiquer rapidement les caractères particuliers des différents modèles de machines électriques.

837. **Machine de Le Roy.** — On paraît employer beaucoup en Allemagne une machine construite par Winter (fig. 224), dans laquelle il n'y a qu'une paire de coussins portée par un pied isolant à l'extrémité d'un diamètre horizontal du plateau, et une mâchoire formée par deux anneaux à l'autre extrémité du même diamètre. Ce genre de machines, qui a été imaginé par Le Roy et dont on construisait au siècle dernier (1) des modèles presque

(1) Sigaud de la Fond, p. 292.

identiques à celui de Winter, produit moitié moins d'électricité que la machine de Ramsden, mais la différence de potentiel peut être notablement plus grande, parce que les deux conducteurs sont plus éloignés. On pourra donc provoquer entre les conducteurs des étincelles plus longues et produire de belles ai-

Fig. 224.

grettes; mais, dans toutes les expériences où l'on a besoin d'un grand débit, comme pour charger les batteries, il vaut mieux employer les appareils qui possèdent deux paires de coussins. Comme les conducteurs dans la machine de Winter sont formés

par de simples boules dont la capacité est très-faible, on ajoute habituellement à l'un d'eux un grand anneau en bois contenant un faisceau de fils de fer; les étincelles deviennent alors plus nourries et plus éclatantes.

M. Emsman (1) remplace cet anneau par une série de tubes de verre fermés à l'une de leurs extrémités, rentrant les uns dans les autres, et dont chacun, sauf le plus large, est recouvert d'une feuille d'étain sur sa surface extérieure. Toutes ces feuilles d'étain communiquent entre elles et avec un crochet extérieur que l'on attache au conducteur de la machine. Il paraît difficile de concevoir l'utilité de toutes ces enveloppes métalliques; la surface d'étain extérieure est la seule qui doive s'électriser, les autres feuilles ne jouant aucun rôle.

838. **Machine de Nairne.** — Dans cette machine, le plateau est remplacé par un cylindre de verre horizontal tournant autour de son axe, soit par l'action directe d'une manivelle, soit par

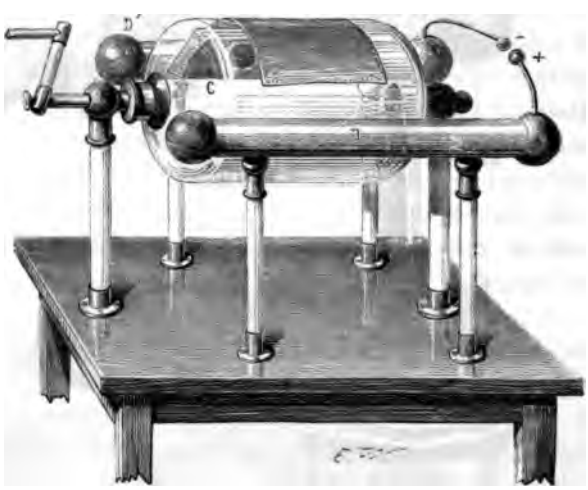


Fig. 225.

une roue et une corde de transmission. Le coussin est porté par un cylindre isolé D' (fig. 225) et appliqué sur le verre à l'aide de ressorts bien flexibles; un cylindre tout semblable D situé du côté opposé porte un peigne métallique de la longueur du coussin; enfin, une bande de taffetas attachée au coussin s'applique,

(1) *Pogg. Annal.*, t. CXLV, p. 552. — *Journal de Physique*, t. II, p. 59.

par l'effet de la rotation, sur la partie supérieure du cylindre et empêche les déperditions. Les deux conducteurs se chargent ainsi d'électricités contraires ; on peut tirer entre eux des étincelles à l'aide de branches métalliques mobiles que l'on approche plus ou moins, ou bien relier l'un des cylindres avec le sol et utiliser ainsi l'une ou l'autre des deux électricités. La machine de Nairne est une des plus élégantes, à cause de sa parfaite symétrie, et l'une de celles qui fournit le plus d'électricité, toutes proportions gardées. Seulement, il est nécessaire d'isoler l'axe, parce que les conducteurs sont trop rapprochés et se déchargeraient facilement si l'axe communiquait avec le sol. La difficulté de se procurer des cylindres de verre de grandes dimensions ne permet guère de construire de pareilles machines dont la longueur soit supérieure à 60 ou 80 centimètres, et le diamètre de plus de 40 centimètres. Les petits cylindres de verre peuvent être travaillés au tour, mais les plus grands ne supporteraient pas cette opération sans danger de rupture, et il faut les employer tels qu'ils ont été soufflés ; les défauts de la surface empêchent alors le coussin de frotter d'une manière continue et régulière.

839. **Machines de Van Marum.** — Van Marum utilisa surtout pour ses expériences une grande machine à deux plateaux construite par Cuthbertson. Les plateaux, de $1^m,65$ de diamètre, étaient éloignés de 19 centimètres et frottaient sur 8 paires de coussins situés, comme dans la machine de Ramsden, aux deux extrémités du diamètre vertical ; les conducteurs étaient portés par des pieds en verre mobiles et communiquaient avec deux peignes doubles situés entre les plateaux aux deux extrémités du diamètre horizontal. Dans cette machine, dont la puissance exceptionnelle est restée célèbre, on a accumulé toutes les précautions pour éviter le plus possible les déperditions accidentelles. Van Marum remarqua d'abord qu'il se produisait rapidement des étincelles en forme de rayons entre les peignes et l'axe de rotation ; pour les supprimer, il isola l'axe en formant les montants des coussins par des tiges de verre, et couvrit les plateaux d'une couche de matière résineuse dans toute la partie centrale qui n'était pas frottée. La déperdition par l'axe ayant disparu, il se produisit des fuites abondantes sous forme d'ai-

grettes par toutes les garnitures qui attachaient les conducteurs aux pieds de verre.

Van Marum remplaça alors les douilles cylindriques que l'on emploie habituellement par des boules de métal d'un pied de diamètre dont la partie inférieure était creusée en forme de large ombilic dans lequel se mastiquait la tige de verre ; cette disposition, qu'il serait peut-être utile de reprendre pour les appareils à potentiels élevés, produisit les meilleurs effets. Les montants des coussins étaient portés par une table à pieds de verre, de façon qu'on pouvait aussi isoler les frotteurs et recueillir l'électricité qui s'y développe. C'est avec cette machine que Van Marum obtint des étincelles de 61 centimètres de longueur et de la grosseur d'un tuyau de plume, et des aigrettes en forme de houppes qui avaient 38 centimètres de diamètre.

Quelques années plus tard, Van Marum fit construire une autre machine qui permet de récolter d'une manière plus égale l'une ou l'autre électricité à volonté, mais non les deux à la fois. Le plateau est porté à l'extrémité de l'axe de rotation et frotte entre deux paires de coussins isolés, situés de part et d'autre aux extrémités du diamètre horizontal. Un arc conducteur, attaché à une sphère isolée et terminé par deux petits cylindres parallèles au plateau, peut être placé dans un plan vertical, de manière à récolter l'électricité positive du verre, ou mis en contact avec les coussins pour y prendre l'électricité négative. Un deuxième arc semblable, porté par la monture de l'axe de rotation et communiquant avec le sol, peut être placé aussi dans un plan vertical, ou ramené au contact des coussins, de manière à faire écouler dans le sol soit l'électricité positive du verre, soit l'électricité négative des coussins. Cette machine ne s'est pas répandue parce qu'elle est encombrante et fragile : la nécessité de porter le plateau de verre à l'extrémité d'un axe rend la construction difficile et exige de lourds contre-poids; l'appareil est incommode à transporter, parce que les dimensions sont à peu près les mêmes dans tous les sens, et le bénéfice que paraît présenter la production d'une électricité quelconque ne compense pas ces inconvénients.

840. **Expériences de Péclet.** — Nous indiquerons plus tard les résultats obtenus avec les différentes machines et la compa-

raison directe de leurs effets ; mais, avant d'aller plus loin, il est nécessaire de justifier le principe même qui a servi de base à nos raisonnements.

Péclet (1) a étudié par expérience l'influence des diverses circonstances qui peuvent modifier le développement d'électricité. Son appareil se composait d'un cylindre de verre horizontal, arrondi et poli au tour, sur lequel était appuyé un frotteur en bois, taillé suivant la même courbure, que l'on pouvait charger de poids différents, et qui était guidé par deux montants verticaux. En face du cylindre, dans le plan horizontal passant par l'axe, était un peigne conducteur relié par une tige de métal assez longue avec un pendule électrique à ressort, qui se déplaçait en face d'un cercle gradué et servait d'électromètre. Péclet recouvrait la face inférieure du frottoir de substances différentes, il substituait même quelquefois au cylindre de verre un cylindre de résine ou un cylindre recouvert de taffetas ciré ; il avait ainsi une machine de Nairne susceptible de recevoir un assez grand nombre de modifications. Voici quels ont été les principaux résultats des expériences :

Comme le conducteur n'a qu'une capacité très-faible, la déviation du pendule augmente rapidement aussitôt que la machine est en marche, et atteint bientôt une divergence maximum, à partir de laquelle il reste immobile ; les déperditions d'électricité par l'air et par les supports, ainsi que les décharges qui s'opèrent entre le peigne et le frotteur, font alors équilibre au débit de l'appareil.

La déviation maximum est indépendante de la vitesse de rotation, excepté quand on emploie comme frotteurs certains corps tels que la pluche de soie, le molleton, et en général les corps garnis de longs filaments, avec lesquels les fuites sont trop abondantes pour un faible débit. Cette déviation est aussi indépendante de la nature du frottoir quand il est formé de substances métalliques, et elle est sensiblement plus faible avec les corps filamenteux ; on prévoit, en effet, que l'intervalle du peigne au frotteur sera alors plus facilement franchi par les étincelles. Enfin, la déviation maximum est indépendante de la pression, à

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. LVII, p. 337.

partir d'une certaine charge qui dépend de la nature des corps, et indépendante de la largeur des frottoirs. Toutefois, les résultats sont moins réguliers quand le corps frottant est mauvais conducteur, parce qu'il n'est pas facile alors de mettre la surface frottante en communication avec le sol, et que l'électrisation se fait d'une manière moins uniforme.

En évaluant le débit par une bouteille de Lane, Péclet a reconnu qu'à partir de certaines limites inférieures, la quantité d'électricité est, dans chaque cas, proportionnelle à la vitesse de rotation, indépendante de la pression et de la largeur du frottoir, mais qu'elle varie avec la nature des substances entre lesquelles s'effectue le frottement.

Péclet a ensuite remplacé le frottoir en bois par un cylindre de cuivre qu'il garnissait de cuir et recouvrait de diverses substances. Ce cylindre était muni de tourillons qui lui permettaient de tourner. En le maintenant immobile, on produisait un frottement de *glissement;* en le laissant libre, il tournait sur lui-même et l'on obtenait un frottement de *roulement*. Péclet a constaté ainsi que les métaux, le papier, les peaux lisses, etc., produisent exactement la même quantité d'électricité par les deux modes de frottement; il se manifeste seulement des différences pour certains corps, comme les étoffes satinées et le taffetas ciré.

Enfin, Wollaston avait annoncé qu'une machine électrique ne produisait plus d'électricité dans l'acide carbonique. Péclet répéta cette expérience, en plaçant une petite machine sous une cloche qu'il remplissait alternativement d'air et d'acide carbonique parfaitement secs, et vérifia, au contraire, que la nature du gaz n'exerce aucune influence appréciable. Le résultat observé par Wollaston tenait sans doute à ce que l'acide carbonique était resté humide.

En résumé, les expériences de Péclet démontrent donc, comme nous l'avons admis, que la quantité d'électricité développée par le frottement de deux corps est indépendante de la pression qu'on exerce, de la vitesse du mouvement, de la nature du frottement et du milieu ambiant, c'est-à-dire, en d'autres termes, qu'il s'établit entre les deux corps mis en contact une différence de potentiel déterminée, indépendante de toutes les circonstances extérieures.

841. **Machine d'Armstrong.** — La machine hydro-électrique de M. Armstrong, qui provoqua d'abord une sorte d'enthousiasme, mais qui est à peu près abandonnée aujourd'hui, repose sur un phénomène dont la découverte est due au hasard. Un ouvrier mécanicien occupé à réparer une machine à vapeur près de Newcastle, ayant une main dans le jet de vapeur qui s'échappait par une fuite, mit l'autre main sur le levier de la soupape à poids; il en tira une brillante étincelle et éprouva une violente commotion. M. Armstrong [1] étudia les circonstances de ce phénomène; il reconnut que la vapeur sortie d'une chaudière par un orifice étroit et sous l'influence d'une forte pression est généralement électrisée, que la quantité d'électricité dépend de la pureté de l'eau que renferme la chaudière, de la nature du corps qui forme les bords de l'orifice d'échappement, et de la pression de la vapeur ; il constata, de plus, ce fait remarquable que la production d'électricité est à peu près nulle si la vapeur est sèche, et que la vapeur saturante, surtout celle qui renferme des gouttelettes liquides déjà condensées, fournit beaucoup plus d'électricité. Une série de recherches sur ce sujet l'ont conduit à la construction d'une machine électrique très-ingénieuse qui comprend : une *chaudière à vapeur*, une *boîte réfrigérante* pour condenser une partie de la vapeur avant la sortie, une série de *becs d'échappement*, et un *conducteur* terminé par un peigne pour récolter l'électricité.

Dans le modèle que construisit M. Ruhmkorff (fig. 226), la chaudière V a 80 centimètres de longueur et 40 centimètres de diamètre; elle est portée par 4 pieds en verre et le foyer est intérieur. Une soupape de sûreté à poids S limite la pression à 4 ou 5 atmosphères. Le réfrigérant est une boîte métallique D qui renferme des étoupes constamment mouillées et qui est traversée par les tubes d'échappement de la vapeur, comme on le voit sur la figure 227. Ces tubes sont terminés à leur sortie de la boîte réfrigérante par des becs d'échappement A dont la construction est assez compliquée. Le prolongement du tube est en cuivre; il porte d'abord une lame verticale *f* (fig. 228) qui le

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. LXXV, p. 328; 3e série, t. VII, p. 401, et t. X, p. 105.

bouche en partie de manière à briser le jet de vapeur. A ce prolongement est vissé un ajutage métallique A garni intérieurement d'un cylindre de buis *b*. Quand la pression est suffisante, on ouvre le robinet R : le jet de vapeur qui vient de la chaudière se condense en partie dans les tubes du réfrigérant D, contourne

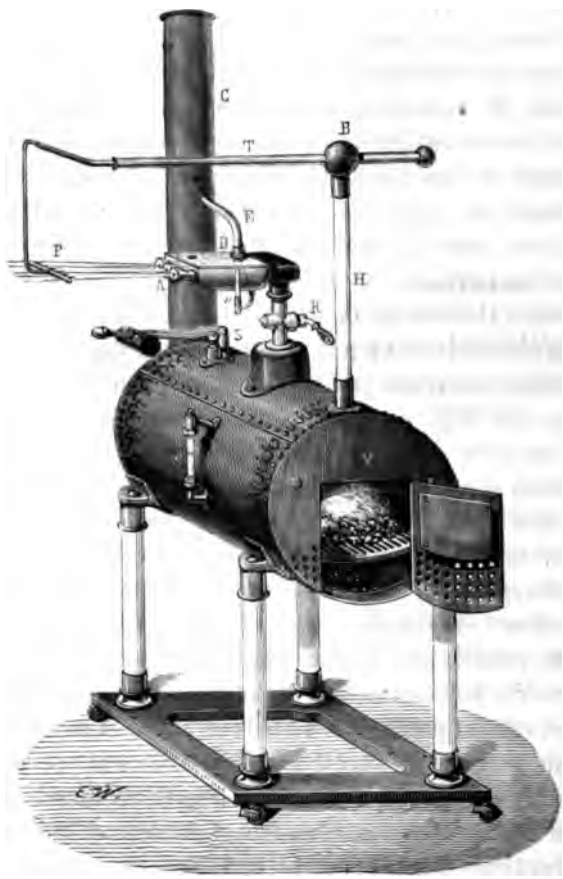


Fig. 226.

la lame *f*, et s'échappe en frottant contre les parois du cylindre de buis. Elle est reçue à peu de distance sur un peigne métallique P qui communique avec un conducteur B isolé. Les becs d'échappement et la chaudière se chargent d'électricité négative, et la vapeur, d'électricité positive; le peigne P s'électrise alors

positivement par un phénomène d'influence et de décharges, comme dans la machine ordinaire.

Pour tirer un bon parti de cet appareil, il faut d'abord nettoyer la chaudière en y introduisant de l'eau ordinaire, dans laquelle on ajoute 1 kilogramme de potasse du commerce. Quand la vapeur est sous pression, on ouvre le robinet, on la laisse s'échapper abondamment par les ajutages, et on fait écouler le reste du liquide. On remplit ensuite la chaudière d'eau distillée, on met dans le foyer du charbon de bois allumé dont on active la combustion par un soufflet; et, lorsque la vapeur commence à fuir par la soupape à levier, on ouvre le robinet. Dans ces conditions, si l'on pose un excitateur par une de ses branches

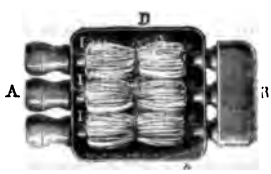


Fig. 227.

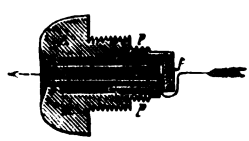


Fig. 228.

sur le conducteur à peigne et qu'on approche l'autre branche de la chaudière, on obtient un jet continu d'étincelles de 12 centimètres de longueur, avec un débit d'électricité près de 3 fois aussi grand que celui d'une machine de Ramsden à plateau d'un mètre de diamètre qui ferait un tour à la seconde.

La grande machine hydro-électrique de l'Institut polytechnique de Londres a une chaudière de 2 mètres de longueur, 46 jets d'échappement pour la vapeur, et elle donne comme un torrent d'étincelles de 60 centimètres de longueur. Cet appareil fournit 3 fois autant d'électricité que la grande machine à frottement du même établissement dont le plateau a $2^{m},27$ de diamètre, et qui est mise en mouvement par un moteur à vapeur.

Ici encore, de même que dans les machines ordinaires, le débit d'électricité augmente avec les surfaces frottées, et la différence de potentiel que l'on peut établir entre le conducteur B et la chaudière est limitée par la distance du peigne aux becs d'échappement. Cette distance ne peut pas être augmentée à volonté, parce que le jet de vapeur finirait bientôt par ne plus aboutir au

peigne d'une manière assez complète. Comme la capacité du conducteur est en général très-faible par rapport à celle de la chaudière, les deux potentiels sont très-différents en valeurs absolues; pour obtenir de grandes distances explosives, il vaudrait mieux relier le peigne avec un conducteur isolé de capacité à peu près égale à celle de la chaudière, afin de diminuer le plus possible les pertes accidentelles. Enfin, si l'on fait communiquer avec le sol le peigne ou la chaudière, le potentiel du conducteur qui reste isolé devient beaucoup plus élevé.

842. **Expériences de Faraday.** — Faraday [1] a étudié avec soin les différentes circonstances qui influent sur la production d'électricité dans cette machine, et observé plusieurs phénomènes assez singuliers.

1° La simple évaporation de l'eau et la condensation de la vapeur ne produisent aucune trace d'électricité.

2° Un courant de vapeur sèche ou surchauffée, c'est-à-dire parfaitement purgée de gouttelettes liquides, ne s'électrise pas. La vapeur obtenue avec de l'eau ordinaire, même quand elle est humide, ne donne que des quantités très-faibles d'électricité, et il suffit d'une petite proportion de sels dissous pour rendre la vapeur neutre. Si l'eau contient en suspension certains corps isolants tels que des essences, de l'huile, des graisses, des résines, etc., la chaudière se charge d'électricité positive, et la vapeur, d'électricité négative. Faraday explique l'influence des sels dissous par la conductibilité que ces corps communiquent à l'eau, et il conclut de l'action exercée par les huiles et les essences que l'électricité n'est pas due au frottement de la vapeur ni même de l'eau liquide sur les ajutages, mais au frottement d'une couche de matière isolante qui entoure les gouttelettes.

3° La nature des becs d'échappement a une grande influence. Avec de l'eau distillée, la vapeur est toujours positive, mais le frottement sur l'ivoire ne donne rien; les métaux réussissent mieux et le buis paraît être de tous les corps solides celui qui fournit le plus d'électricité.

4° De même, un jet d'air parfaitement sec, provenant d'un réservoir où ce gaz est comprimé, ne produit pas d'électricité;

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. X, p. 88.

mais, quand l'air est humide, le tube de dégagement est électrisé négativement et l'air positivement. Dans cette expérience, comme pour la vapeur humide, la production d'électricité doit être attribuée au frottement des gouttelettes liquides.

5° On peut s'attendre à obtenir des résultats analogues en remplaçant les gouttelettes liquides par des poussières quelconques entraînées dans un courant de gaz. Faraday a constaté, en effet, que l'écoulement par un ajutage d'un jet d'air chargé de poussières quelconques produit presque toujours de l'électricité ; le signe électrique du courant de gaz varie avec la nature des poussières, et la production d'électricité est toujours beaucoup moindre qu'avec de la vapeur humide.

MACHINES ÉLECTRIQUES FONDÉES SUR L'INFLUENCE ET LE TRANSPORT.

843. **Électrophore double.** — Toutes les fois qu'on soulève le disque d'un électrophore, après avoir établi les contacts convenables, on obtient une certaine quantité d'électricité; si l'on répète la même opération d'une manière continue, on réalisera une véritable source dont le débit sera proportionnel à la rapidité des opérations. Au lieu de dépenser l'électricité à mesure de sa production, on peut s'en servir pour électriser un conducteur; si ce conducteur avait une cavité assez grande pour renfermer le disque de l'électrophore, de manière à le ramener à l'état neutre après chaque contact, on pourrait y établir un potentiel très-élevé, n'ayant d'autre limite que les fuites inévitables et la distance du conducteur aux corps voisins non isolés. Enfin, il est possible d'imaginer une disposition mécanique qui établirait les contacts et réaliserait les différents mouvements du plateau. Dans une pareille machine, le gâteau serait électrisé une fois pour toutes par frottement, et les différentes opérations serviraient à multiplier la charge primitive.

Un appareil ainsi construit présenterait cependant un inconvénient, c'est que l'électrisation du gâteau diminue peu à peu, de sorte et qu'au bout d'un certain temps il serait nécessaire de le frotter de nouveau pour lui restituer ses propriétés primitives.

Il est vrai que cette dernière opération peut être évitée, en profitant de l'électrisation réciproque de deux électrophores de signes contraires (118). Lichtenberg (1), par exemple, se servait d'un gâteau isolant de forme oblongue où il pouvait placer le disque dans deux positions différentes n'empiétant pas l'une sur l'autre. L'une de ces plages étant électrisée même faiblement, on pouvait électriser la plage voisine en sens contraire en y appliquant le disque par sa tranche, puis utiliser cette nouvelle plage pour augmenter la charge de la première.

Un électrophore double peut donc fournir indéfiniment de l'électricité au potentiel le plus élevé que permette l'isolement des conducteurs, sans qu'il soit jamais nécessaire de frotter de nouveau le gâteau isolant. Cette production d'électricité par un appareil qu'on a chargé une fois pour toutes, et qui se maintient dans un état constant par suite de réactions réciproques, est le principe des machines dont nous avons maintenant à parler.

844. **Duplicateurs électriques.** — Il ne paraît pas facile de réaliser par des moyens mécaniques tous les mouvements qu'exigerait l'emploi d'un électrophore double, surtout pour rétablir la charge du gâteau; mais le principe de la multiplication des charges peut être utilisé d'une autre manière, en ne faisant intervenir que des corps conducteurs.

Bennet (2) a imaginé une disposition qui permet de doubler constamment une première charge électrique, et il a donné à son appareil le nom de *duplicateur*. Cet instrument se compose en principe de trois plateaux conducteurs isolés A, B et C, les deux premiers fixes et le troisième mobile. Le plateau A étant chargé primitivement d'une quantité d'électricité $+m$, on en approche le plateau mobile C mis en communication avec le sol; la charge de signe contraire que prend le plateau mobile est plus faible que la charge influente, mais elle s'en rapproche d'autant plus que la distance est moindre; pour simplifier les raisonnements, nous supposerons ces charges égales. Le plateau C ainsi chargé d'une quantité d'électricité égale à $-m$ est isolé puis porté en face du plateau B communiquant avec le sol, lequel prend par influence une charge égale à $+m$.

(1) *De Nova Methodo*, etc. p. 9 (1778).
(2) *Phil. trans. abridg.*, vol. XVI, p. 282 (1787).

Après avoir isolé B, on le fait communiquer avec le plateau A dont on approche le plateau C non isolé; la charge totale $+ 2m$ des deux plateaux A et B se réunit alors sur le premier, le plateau C prend une charge égale à $- 2m$, et on sépare A et B. L'appareil est ainsi ramené dans l'état primitif et la quantité d'électricité a été doublée; une nouvelle opération toute semblable produira encore le même effet et, de cette manière, on accumulera successivement sur le plateau A des charges électriques égales à m, $2m$, $4m$, $8m$,... En réalité, si l'on désigne par α et β des fractions qui diffèrent peu de l'unité, la première charge du plateau C est égale à αm, celle du plateau B égale à $\alpha^2 m$, et la charge finale du plateau A, après le cycle complet des opérations, égale à $(1 + \alpha^2)\,\beta m = pm$, le coefficient p étant compris entre 1 et 2. Les charges successives du plateau A sont alors m, pm, p^2m, p^3m...; elles croissent comme les termes d'une progression géométrique. Quelque faible que soit la charge primitive, on peut ainsi la multiplier jusqu'à ce qu'elle soit sensible à un électromètre ou même provoque des étincelles.

L'électroscope à trois plateaux de Péclet (268) permet aussi d'augmenter une charge électrique donnée, mais par voie d'addition seulement, si l'on opère comme nous l'avons indiqué. On pourrait, en modifiant la manière d'établir les contacts, le transformer en un multiplicateur géométrique; ce problème a reçu d'ailleurs un grand nombre de solutions.

Cavallo fit construire un appareil dans lequel les diverses communications qu'exige le duplicateur de Bennet s'établissaient par des dispositions mécaniques, sans l'intervention de l'opérateur; Bohnenberger imagina aussi une disposition analogue, mais, dans les deux cas, le problème était résolu par le mouvement alternatif du plateau, ce qui est toujours moins commode qu'une rotation continue.

845. **Duplicateur de Nicholson.** — Darwin publia en 1787 un duplicateur à rotation qui était formé de quatre plateaux dont deux fixes et deux mobiles. Nicholson [1] indiqua l'année suivante un appareil à rotation n'ayant que trois plateaux, qui réalisait exactement le duplicateur de Bennet. Cet appareil se compose

[1] *Phil. trans. abridg.*, vol. XVI, p. 305 (1788).

de deux plateaux verticaux fixes et isolés A et B (fig. 229), portés à l'extrémité des tiges de métal *a* et *b*; un troisième plateau C, isolé aussi, est mobile autour d'un axe horizontal formé d'une tige de verre que l'on fait tourner à l'aide d'une manivelle d'une manière continue. Une tige de métal D, munie d'une lame flexible, met le plateau mobile C en communication avec le sol toutes les fois qu'il se trouve en face du plateau fixe A. L'axe porte encore trois autres fils de métal qui communiquent entre eux : les deux premiers *p* et *q* rectilignes et perpendicu-

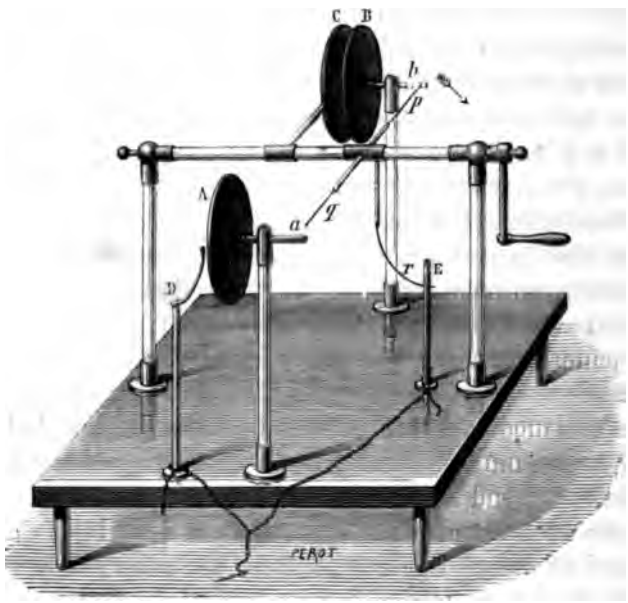


Fig. 229.

laires à l'axe de rotation, le troisième *r* recourbé de manière à pouvoir toucher la tige E non isolée. La tige *b* est un peu plus rapprochée de l'axe que la tige *a*; le ressort *p* touche alternativement les deux tiges à chaque rotation, mais le ressort *q* est un peu plus court et touche seulement la première. Lorsque l'appareil, par suite du mouvement qui s'effectue dans le sens de la flèche, est dans la position indiquée par la figure, il correspond au deuxième cas que nous avons décrit : les plateaux A et C sont isolés et le plateau B communique avec le sol. Après une

rotation de 180°, les ressorts p et q touchent respectivement les tiges a et b, les plateaux A et B sont isolés mais communiquent entre eux, et le plateau C est relié au sol par le ressort D; ce qui correspond à la première position. Si l'on a commencé par charger un peu le plateau A, il arrive au bout de quelque temps que des étincelles se produisent entre les deux plateaux C et A. On peut donc se servir de cet appareil comme d'une machine électrique, mais il ne paraît pas avoir jamais donné de résultats bien satisfaisants.

Les multiplicateurs et les électrophores tournants, très-en faveur à la fin du siècle dernier, ont reçu des formes très-variées; mais ils étaient oubliés, lorsque parurent à peu près simultanément les machines de M. Tœpler (1) et de M. Holtz (2) qui ont fait entrer la construction des électromoteurs par influence dans une voie toute nouvelle.

846. **Machine de Tœpler.** — La figure 230 représente sous sa forme la plus simple l'appareil de M. Tœpler. C′ est un disque de verre qui, par un système de cordes et de poulies, est animé d'un mouvement de rotation rapide autour d'un axe vertical. Sur la face inférieure du disque de verre sont collées deux armures d'étain ayant la forme de grands segments, et la face supérieure porte deux bandes demi-circulaires A et B qui communiquent séparément avec les segments correspondants de la face opposée.

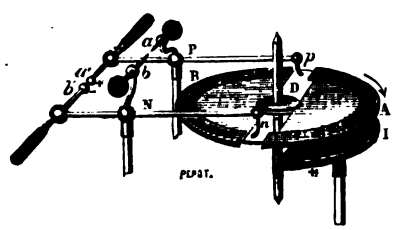


Fig. 230.

Deux conducteurs isolés P et N portent à leurs extrémités des ressorts très-flexibles p et n qui, pendant le mouvement de rotation, appuient alternativement sur les bandes A et B.

Au-dessous du disque mobile est un plateau conducteur isolé I, de mêmes dimensions que les segments, et qui joue le rôle de l'inducteur employé par M. Thomson dans ses électromètres.

(1) *Pogg. Ann.* t. CXXV, p. 469. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. VIII, p. 313.

(2) *Pogg. Ann.* t. CXXVI, p. 157. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. VIII, p. 201.

Le jeu de cet appareil est facile à comprendre. Supposons que l'inducteur I soit mis en communication avec une source à potentiel constant, comme une pile sèche, fournissant de l'électricité positive. Dans une position un peu antérieure à celle que représente la figure, le conducteur ApP s'électrise par influence : l'extrémité la plus éloignée P se charge d'électricité positive, et le secteur A d'électricité négative. Après avoir quitté le ressort *p*, ce secteur porte son électricité négative sur la tige N par l'intermédiaire du ressort *n* ; en même temps l'autre secteur B vient prendre la place du premier et s'électrise à son tour sous l'influence de l'inducteur. Le même effet se reproduisant d'une manière continue, on voit aisément que, si l'on fait abstraction des fuites, la charge des conducteurs P et N augmente comme les termes d'une progression géométrique. Toutefois, si l'électricité n'est pas dépensée à mesure de sa production, la différence de potentiel de ces conducteurs atteint bientôt une valeur maximum ; il se produit alors des décharges entre les différentes parties de l'appareil, et particulièrement une pluie de très-fines étincelles entre les secteurs mobiles et le plateau inducteur. On pare à cet inconvénient en reliant les conducteurs aux deux branches d'un excitateur formé par deux vis *a* et *b* que l'on peut à volonté rapprocher l'une de l'autre, et en formant l'inducteur par une lame de verre vernie sur sa face supérieure et munie d'une feuille d'étain sur l'autre face.

Malgré ces précautions, la machine ne tarderait pas à s'éteindre, et il est nécessaire de recourir à une source étrangère pour maintenir constant le potentiel de l'inducteur. M. Tœpler a eu l'idée d'associer deux appareils semblables qui se maintiennent l'un et l'autre en activité par leurs réactions réciproques.

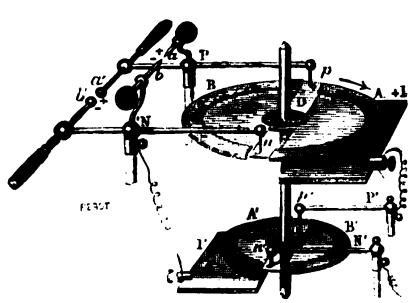


Fig. 251.

La figure 251 représente un appareil double. L'arbre de rotation porte deux disques D et D', de dimensions différentes et munis de lames d'étain disposées

de la même manière. L'inducteur I de la première machine communique avec l'un des ressorts p' de la seconde, l'inducteur I' de celle-ci avec le ressort de signe contraire n de la première; le conducteur P de la première reste isolé et le conducteur N' de la seconde communique avec la terre.

Supposons que l'inducteur I soit d'abord électrisé positivement et la machine en marche, le conducteur P prendra de l'électricité positive, le conducteur N et l'inducteur I' de l'électricité négative, et le secteur A' devenu positif pendant qu'il communique avec le sol par la tige N' ira ensuite par le ressort p' augmenter la charge du premier inducteur I. La seconde machine joue donc le rôle de *régénérateur* d'électricité pour la première. La différence de potentiel des conducteurs P et N augmente rapidement, jusqu'à ce que le débit d'électricité soit compensé par les fuites qui ne tardent pas à se manifester de tous côtés. M. Tœpler a obtenu ainsi entre les pointes a et b, ou entre deux corps quelconques a' et b' reliés aux conducteurs P et N, un flux abondant d'étincelles électriques qui pouvaient avoir jusqu'à 1 pouce de longueur. Si l'on voulait produire un courant constant dans un circuit continu et conducteur, il faudrait faire communiquer les tiges P et N, mais alors, le conducteur formé par le secteur A' et l'inducteur I se trouvant placé entre deux corps conducteurs A et I' au même potentiel, les deux machines cesseraient de fonctionner. Pour obtenir un courant permanent, M. Tœpler combine un appareil double et un appareil simple, le premier restant ouvert et servant à maintenir un potentiel constant sur l'inducteur du second.

Il est nécessaire d'amorcer la machine double en approchant de l'inducteur I un corps électrisé; cependant M. Tœpler a constaté que sa machine s'amorçait d'elle-même, quand on la faisait tourner pendant cinq ou six minutes sans lui communiquer aucune trace d'électricité. Ce développement spontané d'électricité peut être attribué, soit au frottement de l'air, soit au frottement des ressorts de contact ou à toute autre cause étrangère même à l'appareil; mais, dans cette hypothèse, le signe de l'électrisation devrait être variable, tandis que l'inducteur I prenait toujours spontanément de l'électricité négative. L'origine de l'électricité paraît devoir être attribuée simplement au contact des métaux;

l'inducteur I était en argent ainsi que les armatures A et B, tandis que les armatures A′ et B′ du régénérateur étaient formées par des lames d'étain. Le conducteur A′I était ainsi terminé par deux métaux différents; or, nous verrons que le contact de deux métaux, même par l'intermédiaire d'un autre métal, établit entre eux une différence de potentiel, très-faible à la vérité, mais suffisante pour provoquer un premier phénomène d'influence et amorcer une machine à réactions réciproques.

M. Tœpler a fait construire sur les mêmes principes un appareil qui comprend un grand nombre de disques montés sur un même axe horizontal, et dont on peut voir un modèle au Conservatoire des arts et métiers ; mais, si ingénieuse qu'elle soit, cette machine est trop compliquée, très-fragile, et elle ne tarda pas à être abandonnée en présence des effets merveilleux que donnait la machine de Holtz.

847. **Machine de Holtz.** — La première machine construite par M. Holtz se compose d'un plateau vertical D (fig. 232) en

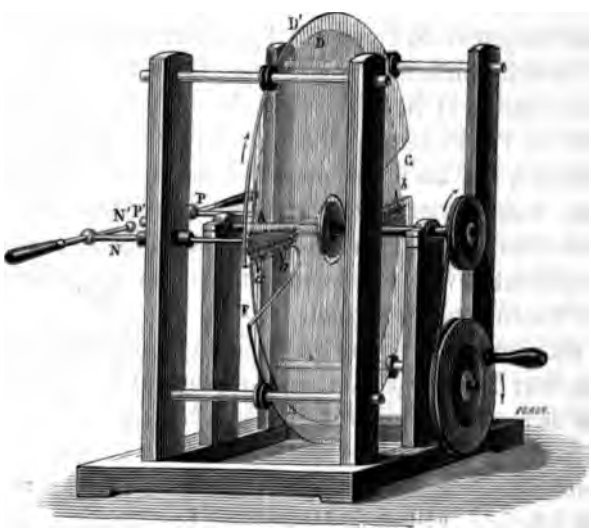


Fig. 252.

verre mince verni à la gomme-laque, que l'on fait tourner avec une vitesse de 5 à 10 tours par seconde. En face de ce plateau mobile et à une petite distance est un plateau fixe D′ un peu plus

large, percé d'une grande ouverture centrale qui laisse passer l'axe de rotation, et dans lequel on a taillé deux fenêtres rectangulaires F et G aux extrémités d'un même diamètre. Sur l'un des bords de chacune des fenêtres est collée une armure de papier A appliquée sur les deux faces et munie d'une ou deux languettes *a* terminées en pointe dans la partie évidée; ces deux armures A et B servent d'inducteurs et sont disposées symétriquement par rapport à l'axe de rotation. La première est seulement pointillée sur la figure, pour laisser voir les pièces situées derrière.

De l'autre côté du plateau mobile sont placés deux conducteurs isolés P et N terminés par des peignes qui se trouvent dirigés vers les armures de papier; ces deux conducteurs peuvent être réunis par une sorte d'excitateur à manches d'ébonite, dont on rapproche ou éloigne les branches à volonté.

Quand on veut mettre l'appareil en activité, on relie d'abord les conducteurs P et N entre eux, en amenant au contact les boules P′ et N′, on fait tourner le disque mobile dans une direction contraire à celle des pointes des armures en papier, et on électrise l'une de ces armures A. Il suffit, pour cela, d'en approcher une plaque d'ébonite que l'on a électrisée en la frottant avec la main ou avec une peau de chat. On entend alors un bruissement particulier qui indique que l'appareil fonctionne; on peut enlever la lame influente, et la production de l'électricité continue tant que le mouvement de rotation est entretenu. Si l'on examine dans l'obscurité la machine en marche, on voit une nappe lumineuse continue qui s'échappe du peigne situé en face de l'armure primitivement électrisée, et se précipite sur le plateau mobile en se courbant dans une direction opposée à celle du mouvement : c'est un flux d'électricité positive. De même, l'autre peigne laisse écouler de l'électricité négative, comme on le reconnaît aux points brillants qui terminent les dents. Enfin les pointes *a* de la première armure laissent aussi échapper de l'électricité positive, et les pointes *b* de l'autre papier de l'électricité négative.

Maintenant, si l'on ouvre l'excitateur en séparant les deux boules P′ et N′ par une distance qui ne soit pas trop grande, cet intervalle est traversé par un flux continu de traits lumineux bleuâtres parallèles ou par des aigrettes en forme de houppes,

la boule P′ fournissant de l'électricité positive, et l'autre de l'électricité négative; mais, si cette distance est trop grande, le flux qui s'écoule par les peignes diminue peu à peu et la machine ne tarde pas à s'éteindre. Si, les boules P′ et N′ étant maintenues à une distance assez faible pour que les étincelles puissent les traverser, on les met séparément en communication avec les armatures d'une bouteille de Leyde ou d'une batterie, on obtient alors des étincelles discontinues qui éclatent toutes les fois que les armatures de la batterie ont atteint une différence de potentiel suffisante. Ces étincelles sont d'autant plus rares et plus puissantes que la capacité électrique de la batterie est plus grande. Habituellement, on suspend aux conducteurs P et N deux petites bouteilles de Leyde réunies par leurs armatures extérieures, de manière à constituer un jeu de cascade; cette disposition permet d'obtenir des étincelles plus longues et empêche la machine de s'éteindre trop facilement. Avec cet appareil, on peut donc faire passer un courant continu dans un fil par lequel on réunit les deux conducteurs P et N que l'on peut considérer comme les pôles, charger une batterie, ou mettre sur un conducteur isolé une électricité de signe quelconque. Dans ce dernier cas, on approchera le conducteur du pôle correspondant, et on en tirera une étincelle.

848. **Jeu de la machine.** — Nous avons indiqué, sans aucune explication, la manière de faire fonctionner la machine de Holtz; ce premier aperçu nous sera utile pour en étudier le jeu électrique. Pour cela, nous aurons recours à un mode de représentation employé par M. Bertin (1). Nous supposerons que le plateau mobile est remplacé par un large tube cylindrique en verre C (fig. 233), à l'intérieur duquel sont

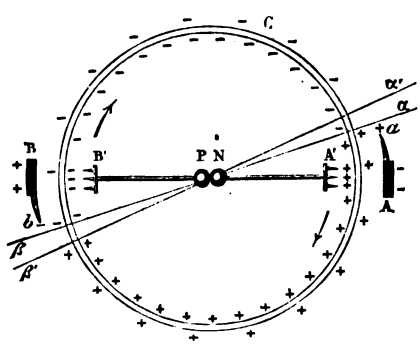


Fig. 233.

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XIII, p. 193.

placées les deux branches NA′ et PB′ du conducteur, munies des peignes A′et B′ ; les armures de papier A et B seront portées par une enveloppe cylindrique extérieure, aussi en verre, entaillée d fenêtres. Cette disposition serait à la machine de Holtz ce que la machine de Nairne est à celle de Ramsden ; elle a été d'ailleurs réalisée par M. Saint-Loup avec succès, mais les communications des conducteurs s'établissent alors d'une manière moins commode, l'appareil acquiert rapidement de grandes dimensions et les cylindres de verre sont plus difficiles à fabriquer, de sorte qu'en définitive cette forme ne paraît pas avantageuse dans la pratique. Nous ne représentons pas dans la figure le cylindre extérieur, qui ne joue pas de rôle important et n'a guère d'autre but que de soutenir les armures de papier.

Supposons que l'armure A soit chargée d'électricité négative, le cylindre mobile en mouvement dans le sens de la flèche, et les boules P et N en contact de façon que le conducteur A′B′ soit continu ; ce conducteur s'électrise par influence. Si le potentiel de l'armure A est assez élevé en valeur absolue, le peigne A′ laissera échapper sur le verre de l'électricité positive, et le peigne B′ de l'électricité négative ; le même phénomène se reproduira, au moins pendant une demi-rotation du cylindre, puisque les portions du verre qui ont reçu l'électricité s'éloignent rapidement et permettent à l'influence de l'armure A de s'exercer de nouveau sur le conducteur. A ce moment, la surface intérieure du cylindre peut être divisée, par un plan à peu près horizontal, en deux parties électrisées en sens contraires, la supérieure négative et l'inférieure positive. Ces couches électriques contribuent à exagérer encore la production d'électricité, par une série de réactions réciproques. En effet, l'armure B*b*, sous l'influence de ces deux couches, se charge à sa base B d'électricité positive, et à sa pointe *b* d'électricité négative qui se répand sur la face extérieure du cylindre ; la même influence s'exerce sur la deuxième armure, dont la charge négative augmente à la base A, et qui laisse échapper par sa pointe *a* de l'électricité positive. Pendant la demi-rotation suivante, la décomposition électrique du conducteur sera donc augmentée, par suite de l'électrisation de la deuxième armure, de l'accroissement de charge de la première, et par l'influence directe

qu'exercent sur les peignes les couches d'électricités répandues à la surface du cylindre tournant.

Si l'on fait abstraction des pertes, les quantités d'électricité doivent croître en progression géométrique; mais bientôt l'appareil atteint un débit maximum, et il s'établit une symétrie complète dans l'état électrique des différents organes. Les deux faces du cylindre sont toujours positives à la partie inférieure et négatives à la partie supérieure, mais le plan de séparation des couches de signes contraires n'est pas horizontal. Le flux positif qui s'échappe du peigne A′ remonte vers la couche négative par suite de l'attraction qu'exerce cette couche et de la répulsion qui provient de la couche inférieure; on le reconnaît à la forme de la nappe lumineuse. Si l'on néglige les différences de propriétés des deux électricités, on voit donc que les deux couches de signes contraires répandues sur la surface intérieure du cylindre seront séparées par un plan $\alpha\beta$ dissymétrique par rapport aux peignes. L'électricité qui s'échappe des pointes de papier se distribuera de même à la surface extérieure du cylindre suivant deux zones séparées par un autre plan $\alpha'\beta'$.

849. Un point délicat à apprécier à priori est de savoir quelles doivent être les propriétés des armures influentes pour qu'elles donnent les meilleurs résultats. On voit bien que, si cette armure était formée d'un corps mauvais conducteur, elle ne pourrait pas réparer ses pertes en s'électrisant par influence : l'expérience a montré, en effet, qu'une lame de mica ne convient pas. Si l'armure était très-conductrice, sa pointe dégagerait sur la surface extérieure du cylindre une grande quantité d'électricité dont l'influence serait de sens contraire à celle de la base et l'on conçoit que la production de la machine diminue; on a constaté aussi que la machine fonctionne avec une lame d'étain, mais ne peut pas atteindre un potentiel élevé. On n'a rien trouvé de mieux que le papier, qui est médiocre conducteur, et dont l'électrisation par influence suffit seulement à réparer les pertes; ce qui semble confirmer encore cette manière de voir, c'est que plusieurs pointes ne conviennent pas autant qu'une seule, et que cette pointe même ne doit pas être très-aiguë.

Quant aux dimensions des armures, elles sont à peu près indifférentes, la seule portion efficace étant celle qui est située

en face des peignes. Une feuille de papier qui couvre tout un quadrant du plateau fixe dans la machine réelle donne les mêmes résultats qu'une bande étroite.

Si l'on faisait tourner le cylindre mobile (ou le plateau) dans le sens même des pointes, on y attirerait l'électricité des armures; on voit aisément qu'alors les feuilles de papier seraient rapidement ramenées à l'état neutre et que toute production d'électricité cesserait. Il suffit, en effet, de faire quelques tours de plateau dans cette direction, pour éteindre complètement la machine la mieux chargée.

M. Riess [1] fait intervenir dans l'explication de la machine de Holtz le phénomène de la double influence dont nous avons dit quelques mots (111); mais, pour que la double influence se produise, il faut que le corps isolant s'électrise lui-même, ce qui exige toujours un certain temps, et la rotation du plateau est trop rapide pour que l'influence exercée sur le verre puisse jouer un rôle appréciable. D'ailleurs, la production des couches électriques de mêmes signes sur les deux faces du plateau mobile s'explique d'une manière si simple par le jeu des pointes des conducteurs et des armures, qu'il n'y a pas lieu de chercher une autre origine.

Le rôle des fenêtres confirme encore cette explication. M. Poggendorf [2] a constaté qu'on peut les remplacer par de simples fentes dans lesquelles on fait passer la bande de papier, de façon que la base soit appliquée sur la face extérieure du plateau fixe, et la pointe sur la face intérieure, du côté du plateau mobile; dans ce cas, en effet, les échanges électriques se font à la manière ordinaire. Mais la machine cesse de fonctionner si la bande de papier est disposée en sens inverse, la base sur la face interne et la pointe à l'extérieur; alors l'électricité qui s'échappe de la pointe dans les premiers instants reste appliquée à la surface extérieure du plateau fixe et s'oppose bientôt à une nouvelle décomposition électrique sur l'armure.

Les fenêtres ne sont cependant pas inutiles et paraissent aug-

(1) *Pogg. Annal.*, t. CXXXI, p. 215. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XIII, p. 190.

(2) *Pogg. Ann.* t. CXXXIX, p. 158. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XIX, p. 480.

menter le débit de la machine. Comme il se forme entre les plateaux une grande quantité d'ozone dont la présence nuit à la production de l'électricité, il est possible que les fenêtres aient surtout pour effet de faciliter le renouvellement de l'air.

850. Si le conducteur A'B', que nous avons supposé continu jusqu'à présent, est interrompu par l'écartement des boules P et N, les deux branches A'N et B'P seront portées par le jeu de la machine à des potentiels différents, le premier négatif, le second positif. Lorsque la différence des potentiels sera suffisante, une décharge se produira entre les boules P et N, et le même phénomène recommencera. La capacité électrique des deux branches étant très-petite, les décharges correspondront à une quantité d'électricité très-faible et se manifesteront sous forme d'aigrettes continues. Si l'on met ces branches en communication avec les armatures de deux bouteilles reliées en cascade, on augmente beaucoup les capacités électriques; il faut plus longtemps pour amener les deux pôles à la différence de potentiel nécessaire à l'explosion, mais la décharge est alors plus puissante et prend la forme de véritables étincelles.

Plus les bouteilles sont grandes, plus les décharges sont énergiques; mais il y a des dimensions à partir desquelles la distance explosive diminue. Pour atteindre la différence maximum de potentiel, il faut que le débit de la machine reste supérieur à la déperdition qui s'effectue par les branches du conducteur et par les bouteilles, et ces déperditions augmentent rapidement avec l'étendue des surfaces. De plus, les peignes sont alors maintenus trop longtemps à un potentiel élevé; la charge des armures baisse en progression géométrique quand le débit des peignes est insuffisant, et la production d'électricité peut s'arrêter.

Lorsque la distance des boules P' et N' est trop grande, il arrive souvent un phénomène curieux : les bouteilles commencent par se charger, puis la machine s'éteint et reprend tout-à-coup en sens contraire, comme on le reconnaît au changement de forme des lueurs qui se produisent aux pointes des peignes et des armures de papier. Chacune des bouteilles se décharge alors lentement par le peigne correspondant, puis se charge d'électricité contraire jusqu'à la même différence de potentiel; après quoi, la même inversion se produit. L'expérience réussit surtout

quand on met les deux pôles en communication avec les armatures d'une grande batterie isolée.

On voit aussi que l'armature extérieure commune aux deux bouteilles est toujours à un potentiel très peu élevé, lorsque les pôles sont maintenus isolés; on obtient, en effet, une étincelle très-faible en réunissant cette armature avec le sol. Cette communication est même utile à établir pour compenser les défauts de symétrie de l'appareil, ou la déperdition inégale des deux électricités, afin que les potentiels des deux conducteurs soient toujours égaux et de signes contraires.

851. En définitive, la machine de Holtz, comme les machines à frottement, permet d'établir entre deux conducteurs une certaine différence de potentiel, et la limite est atteinte lorsqu'une étincelle peut éclater directement d'un peigne à l'autre le long de la surface du disque mobile, en supposant qu'il n'y ait pas dans l'instrument d'autres organes permettant des décharges plus faciles; ainsi on voit souvent des aigrettes qui s'échappent de différents points des tiges conductrices, et des étincelles qui partent d'une armature à l'autre de chacune des bouteilles. C'est pour ce motif que les bouteilles sont longues et l'armature extérieure peu élevée, afin qu'elles puissent supporter une différence de potentiel égale à la moitié de celle que comporte la machine. D'autre part, le débit des peignes étant arrivé à son régime régulier, la quantité d'électricité doit être proportionnelle à la vitesse de rotation. Pour le vérifier, il suffit de réunir les deux pôles avec les deux armatures d'une bouteille de Lane; on constate que le nombre des décharges de la bouteille de Lane est très-sensiblement proportionnel à la vitesse de rotation de la manivelle, à partir d'une certaine limite inférieure au-dessous de laquelle la machine fonctionne mal. La vérification se fait d'une manière simple quand on choisit la distance explosive de la bouteille de façon qu'il se produise un nombre entier de décharges pour chacun des tours de manivelle; ce même nombre se conserve, quelle que soit la vitesse de rotation.

Le débit est lui-même indépendant du potentiel absolu des armatures ou des pôles de la machine; on peut, en effet, mettre l'une d'elles en communication avec le sol, sans que le nombre des décharges de la bouteille de Lane soit modifié.

Enfin, pour montrer que la différence des potentiels des deux pôles est seule définie, on met l'un d'eux en communication avec un électroscope de Henley à cadran et on observe la déviation que marque le pendule avant chaque étincelle. L'autre pôle étant alors mis en communication avec le sol, le pendule atteint avant l'explosion une déviation beaucoup plus grande qui devrait correspondre à un potentiel double en valeur absolue. Toutefois, il arrive assez souvent qu'avec cette nouvelle disposition les étincelles ne peuvent plus franchir la distance primitive, parce qu'il se produit alors entre différents organes de la machine, tels que les supports et les courroies, des nappes lumineuses et des aigrettes qui ne permettent pas au conducteur isolé d'atteindre son potentiel théorique.

852. Ce premier modèle de machine de Holtz est un instrument délicat, très-sensible à l'humidité atmosphérique. La circonstance qui paraît la plus importante, et on peut en dire autant de tous les appareils d'électricité statique, ce n'est pas tant l'état hygrométrique que la quantité absolue de vapeur d'eau qui existe dans l'air; Coulomb (39) avait déjà reconnu qu'il existe une relation directe entre le coefficient de déperdition de l'électricité et le poids de vapeur contenue dans l'unité du volume d'air, indépendamment de la température. De même, la machine de Holtz fonctionne admirablement par les temps secs et froids, comme ceux que produisent dans nos climats les vents d'Est pendant l'hiver; mais il est quelquefois difficile de l'amorcer pendant les journées chaudes de l'été, et surtout dans l'atmosphère humide d'une salle remplie d'auditeurs.

On évite autant que possible l'humidité, en particulier celle qui se condense sur les supports en verre, en plaçant la machine sur une table en bois dont la tablette est percée d'un grand trou, et dont on entoure les pieds d'une toile pour en faire une sorte de cheminée. Sous cette table on dispose un fourneau contenant du charbon de bois bien allumé et brûlant sans fumée. Les conditions extérieures ne sont jamais assez mauvaises pour qu'une machine ainsi entretenue ne donne d'excellents résultats.

Une autre circonstance à laquelle on néglige souvent de donner une attention suffisante, c'est l'état de la lame d'ébonite qui sert à amorcer la machine; si cette lame ne peut pas s'électriser

par frottement au point qu'on en tire avec le doigt des étincelles d'un centimètre, elle n'établira pas sur les armures de papier un potentiel suffisant pour provoquer l'écoulement d'électricité par les peignes.

853. **Conducteur diamétral.** — La machine ordinaire présente encore l'inconvénient de s'éteindre ou de s'intervertir lorsque la distance explosive devient trop grande, ou lorsque des potentiels élevés sont maintenus pendant trop longtemps sur les conducteurs. Il faut alors amorcer de nouveau l'appareil, ce qui est une grande gêne dans une série d'expériences suivies. On a cherché à y remédier par différentes modifications.

L'une des plus ingénieuses est celle du *conducteur diamétral* imaginé par M. Holtz (1). Les armures de papier sont formées par deux bandes qui couvrent presque toute l'étendue d'un quadrant du plateau fixe. En face du plateau mobile on installe, à l'aide d'un manchon d'ébonite que l'axe traverse librement, un conducteur terminé par deux peignes semblables aux peignes ordinaires; ce conducteur peut être placé dans différentes positions, parallèlement à l'un des diamètres du plateau mobile.

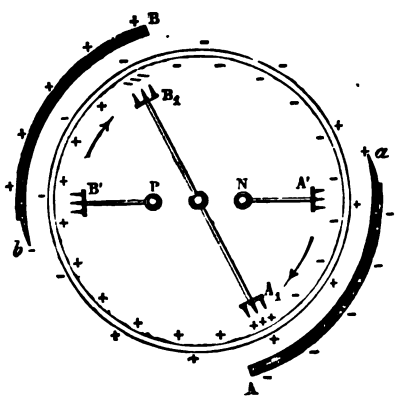


Fig. 234.

Pour en expliquer le rôle, nous prendrons encore le même mode de représentation que plus haut, en remplaçant les plateaux par des cylindres. Supposons que les armures de papier A*a* et B*b* (fig. 234) couvrent l'étendue d'un quadrant, et que le conducteur diamétral $A_1 B_1$, placé devant ces armures, fasse avec la ligne des peignes un angle d'environ 60°.

Si les boules P et N sont en contact et que la machine fonctionne à la manière habituelle, le conducteur diamétral ne joue aucun rôle. En effet, le conducteur A'B' a toujours un potentiel

(1) *Pogg. Annal.*, t. CXXXVI, p. 171. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XXIII, p. 332.

sensiblement nul; quand une certaine région du verre passe en face du peigne A', par exemple, ce peigne y verse de l'électricité positive jusqu'à ce que la couche négative du papier et les deux couches positives du verre aient à l'extrémité des pointes un potentiel nul. Le potentiel étant à peu près constant sur l'armure du papier, lorsque les mêmes points du verre arriveront en face du peigne suivant A_1, le potentiel à l'extrémité des pointes de ce peigne sera encore nul, s'il n'y a pas eu dans le trajet de pertes d'électricité. Comme le même phénomène se reproduit exactement à l'autre extrémité B_1, le conducteur diamétral est toujours en équilibre électrique. L'expérience indique, en effet, que ses peignes ne fournissent rien, sauf une petite quantité d'électricité négative en A_1 et d'électricité positive en B_1, ce qui contribue en réalité à diminuer le débit de la machine, mais d'une manière insignifiante.

Si l'on écarte, au contraire, les conducteurs P et N à une distance telle que les étincelles ne puissent plus éclater entre eux, les peignes A' et B' ne fonctionnent plus, abstraction faite des pertes, le conducteur diamétral agit alors comme le conducteur primitif A'B', verse de l'électricité positive par le peigne A_1 et négative par le peigne B_1, de sorte que le jeu de la machine s'entretient comme précédemment.

Dans le cas intermédiaire où le conducteur A'N débite de l'électricité, mais reste maintenu à un potentiel négatif élevé, le peigne suivant A_1 verse sur le plateau de l'électricité positive, jusqu'à ce que le potentiel à l'extrémité des pointes soit encore nul. De cette façon, la charge totale que reçoit le verre mobile est toujours la même, quelque communication qu'on établisse sur les conducteurs principaux P et N, et quelle que soit la distance à laquelle on provoque les étincelles.

En résumé, le conducteur diamétral n'augmente pas le débit d'électricité qui s'écoule dans le conducteur principal A'B'; il peut même le diminuer un peu, mais il empêche absolument la machine de s'éteindre ou de s'intervertir, tant que le mouvement de rotation est entretenu.

854. **Machines doubles.** — M. Poggendorf [1] a indiqué une

[1] *Pogg. Ann.*, t. CXLI, p. 161. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XXIII, p. 335.

autre disposition qui conduit à peu près au même résultat, au point de vue de la conservation de la charge, sans qu'il soit aussi facile d'en donner la raison : ce sont les *machines doubles*. La machine double que M. Poggendorf a fait construire, uniquement dans le but d'augmenter le débit, se compose de quatre plateaux dont deux mobiles portés par un même axe, et deux fixes placés de part et d'autre des premiers ; les plateaux fixes ont chacun deux fenêtres munies d'armures de papier dont les pointes sont dirigées de la même manière. Entre les plateaux mobiles sont placés deux doubles peignes situés en face des armures de papier et communiquant avec les deux branches du conducteur. L'ensemble de l'appareil représente donc deux machines ordinaires réunies séparément par leurs pôles de même nom ; la quantité d'électricité est en effet double de celle que l'on obtient avec un seul plateau mobile.

La machine double de M. Poggendorf est disposée d'une manière incommode pour les communications qu'il est nécessaire d'établir entre les conducteurs ; celle que construit M. Ruhmkorff (fig. 235) a une forme beaucoup plus avantageuse.

Les deux plateaux fixes, munis de leurs armures de papier, sont situés à l'intérieur, et les plateaux mobiles à l'extérieur. Les papiers placés en regard l'un de l'autre sur les plateaux fixes s'électrisent de la même manière, les peignes correspondants sont portés par une mâchoire métallique analogue à celles des machines à frottement. Les deux conducteurs de métal qui portent ces mâchoires forment les pôles de la machine et peuvent être réunis à leurs extrémités P et N par une branche mobile à poignée d'ébonite, qui constitue un excitateur ; ces conducteurs communiquent, comme d'habitude, avec les armatures intérieures de deux bouteilles de Leyde K et H réunies en cascade. Deux tiges de métal P′ et N′, portées par des plaques d'ébonite, peuvent être élevées à volonté par des tubes à coulisse jusqu'au contact des boules P et N ; ces tiges sont souvent utiles pour établir d'une manière commode les communications des pôles de la machine avec des corps étrangers, et surtout pour ménager des distances explosives dans un circuit.

Quand on veut amorcer l'appareil, il suffit, pendant que les plateaux tournent dans un sens convenable et que l'excitateur

est fermé, d'introduire entre les plateaux fixes une plaque d'ébonite électrisée, avec laquelle on touche l'une des armures de papier; les autres armures se chargent bientôt par le jeu des influences réciproques.

Cette machine double ne devrait, en théorie, différer d'une machine simple que par le débit; mais on obtient des étincelles plus longues (22 centimètres, au lieu de 18, avec des plateaux de 50 centimètres de diamètre), et surtout on peut impunément ou-

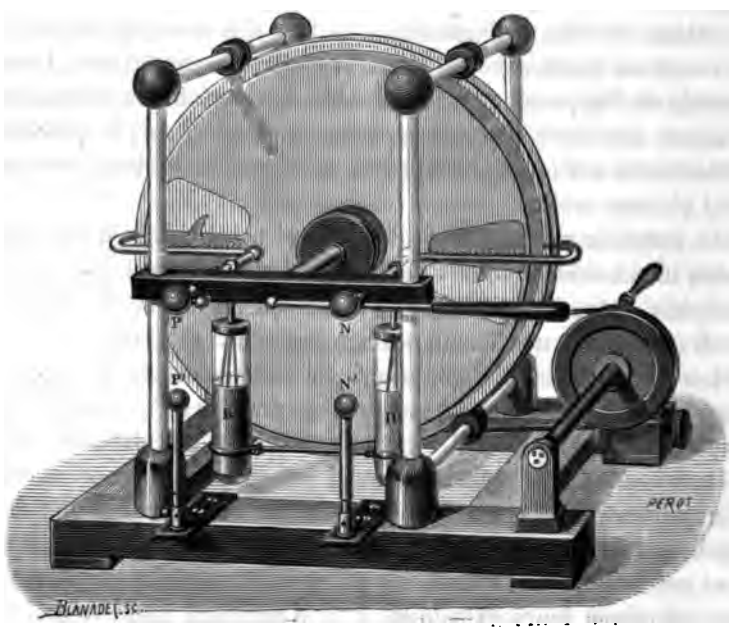


Fig. 235.

vrir l'excitateur sans qu'elle cesse de fonctionner; si on abandonne l'appareil à lui-même, dans une atmosphère qui ne soit pas trop humide, il reste électrisé pendant plusieurs heures et se remet à fonctionner aussitôt que l'on fait tourner les plateaux, sans qu'il soit nécessaire de l'amorcer de nouveau. Cette conservation curieuse de la charge est assez difficile à expliquer. Les conducteurs ne doivent y jouer aucun rôle puisqu'ils communiquent entre eux et sont par conséquent au même potentiel; elle est due plutôt à la disposition des armures de papier. Deux ar-

mures voisines sont en effet dans le même état, par raison de symétrie, et la couche d'air située entre elles se trouve maintenue à un potentiel constant égal à celui des armures (surtout si celles-ci ont de grandes dimensions et sont très-rapprochées), de sorte que la déperdition d'électricité qui peut avoir lieu par cette couche d'air est considérablement diminuée; les pointes des armures sont d'ailleurs assez mousses pour ne pas causer non plus une déperdition rapide.

Quoi qu'il en soit, la machine double ainsi disposée donne, comme il est facile de s'en assurer par une bouteille de Lane, une quantité d'électricité deux fois aussi grande que les machines simples, lorsque la distance explosive est faible; mais le rapport des débits est bientôt modifié, quand on augmente la longueur des étincelles, et croît sans limites, puisque la machine simple cesse de fonctionner pour des distances auxquelles la machine double, à diamètre égal, continue de donner des étincelles. Nous indiquerons plus loin les résultats numériques de cette comparaison.

855. **Machine à deux rotations.** — M. Holtz (1) a imaginé aussi une disposition ingénieuse, dans laquelle il a supprimé les plateaux fixes et les armures de papier. L'appareil (fig. 236) se

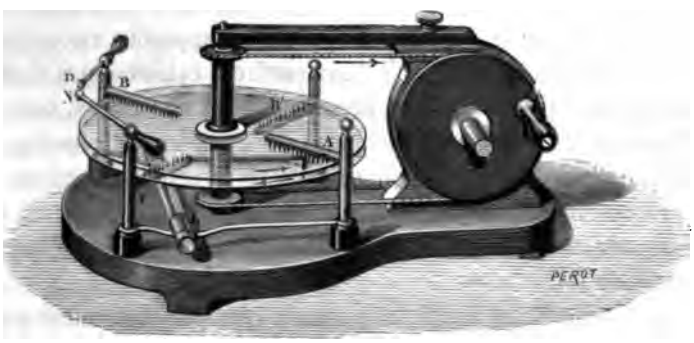


Fig. 256.

compose de deux plateaux de verre tournant autour d'un même axe, mais en sens contraires. Quatre peignes conducteurs sont placés : deux A et B au-dessus du plateau supérieur et aux ex-

(1) *Pogg. Annal.*, t. CXXX, p. 135. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XIII, p. 195 et p. 441.

trémités d'un même diamètre, les deux autres A′ et B′ au-dessous du plateau inférieur et à angle droit avec les premiers; ces peignes communiquent deux à deux par des tringles de métal, comme on le voit sur la figure, et forment ainsi deux conducteurs que l'on peut réunir ou séparer à l'aide d'un excitateur à boules P et N. Ces conducteurs sont isolés par des pieds en ébonite. Pour charger la machine, l'excitateur étant fermé, on fait tourner les plateaux de telle façon que chacun d'eux, à partir de l'un des peignes A qui lui correspond, s'éloigne du peigne A′ auquel celui-là est réuni, comme l'indiquent les flèches, et on approche de l'un des peignes une lame d'ébonite électrisée. Il se produit bientôt un bruissement auquel on reconnaît que la machine est amorcée; on enlève alors la lame influente et, en écartant les boules de l'excitateur, on obtient un jet continu d'aigrettes. Ces aigrettes se transforment en étincelles plus énergiques et moins fréquentes, si l'on réunit les deux conducteurs avec les armatures d'une sorte de bouteille de Leyde construite d'une manière très-simple : c'est un tube de verre L qui porte vers les extrémités des bandes d'étain circulaires collées sur les deux faces, et dont les feuilles intérieures sont réunies par un ruban d'étain, de façon à figurer les trois armatures de deux bouteilles réunies en cascade.

Pour expliquer le jeu de cet appareil, supposons encore que l'on remplace les plateaux par deux surfaces cylindriques C et C′ concentriques (fig. 237), et tournant en sens contraires, comme l'indiquent les flèches. Le peigne A du cylindre intérieur communique d'une manière permanente avec le peigne extérieur A′, les peignes B et B′ communiquent de même entre eux, et ces deux conducteurs peuvent être réunis par les deux branches de l'excitateur PN.

L'excitateur étant fermé, supposons que par une cause quelconque, comme l'influence d'une plaque d'ébonite électrisée placée en face du peigne A pendant une demi-rotation, ce peigne ait versé de l'électricité positive sur la moitié inférieure du petit cylindre; le peigne opposé B aura versé en même temps une quantité égale d'électricité négative. On peut maintenant supprimer le corps influent et la machine s'entretiendra d'elle-même. En effet, les deux couches électriques du cylindre intérieur agis-

sent par influence sur les peignes extérieurs A′ et B′ qui versent à leur tour, le premier de l'électricité positive et le second de l'électricité négative, de sorte que le cylindre extérieur sera électrisé positivement à gauche et négativement à droite; ces couches réagiront à leur tour sur les peignes A et B pour provoquer un écoulement d'électricité de même signe que celui qui s'était produit d'abord. Il est clair que le débit d'électricité croîtra d'abord en progression géométrique, et atteindra bientôt un maximum où il sera équilibré par les pertes.

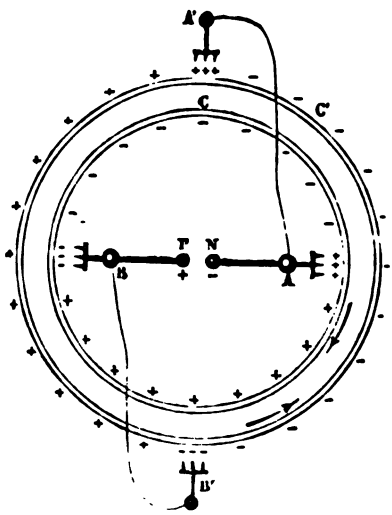


Fig. 257.

Comme les deux peignes A et A′ d'un même conducteur débitent la même électricité, l'excitateur PN est traversé par un flux électrique dans un sens déterminé. Si l'on sépare les deux boules, le conducteur P sera porté à un potentiel positif, l'autre à un potentiel négatif; on obtiendra entre eux une série de décharges en aigrettes continues, si leur capacité électrique est très-faible, ou en étincelles intermittentes si on les met en communication avec d'autres conducteurs, comme les armatures extrêmes de deux bouteilles en cascade.

Si l'on faisait tourner les cylindres (ou les plateaux dans la machine réelle) dans le sens opposé, il est aisé de voir que la machine fonctionnerait encore; mais alors les deux peignes A et A′ d'un même conducteur verseraient des électricités différentes, les deux conducteurs seraient constamment au même potentiel (zéro), et le contact ou la séparation des branches de l'excitateur ne produiraient aucun effet; il serait impossible d'y obtenir des étincelles.

La machine porte quelquefois un cinquième peigne placé, par exemple, en face du peigne B′ et communiquant avec lui,

pour obtenir un effet analogue à celui du conducteur diamétral de la machine ordinaire. Il ne semble pas toutefois que le rôle de ce cinquième peigne soit très-efficace.

A diamètre égal, la machine à deux rotations doit fournir deux fois autant d'électricité que la machine ordinaire, puisqu'elle possède un nombre de peignes double, et le débit est encore proportionnel à la vitesse de rotation. Quant à la différence des potentiels, elle est limitée aussi, s'il n'y a pas d'autres causes de fuites plus rapides, par la condition que les étincelles ne puissent éclater directement entre deux peignes opposés, le long de la surface du verre.

Cette machine présente des difficultés de construction particulières, à cause des deux plateaux qui doivent tourner en sens contraires sur un même axe; on n'en a réalisé jusqu'à présent que des modèles assez petits, dans lesquels le diamètre des plateaux ne dépasse pas 40 centimètres, mais qui donnent d'excellents résultats.

856. **Machine de Carré.** — Le seul inconvénient des machines de Holtz est la nécessité de les amorcer par un corps étranger, et il arrive quelquefois que les circonstances atmosphériques sont assez désavantageuses, ou la lame d'ébonite en assez mauvais état, pour qu'on ait quelque peine à provoquer les premières décharges. M. Carré a construit un appareil (fig. 238), dans lequel le corps influent est un disque dont l'état électrique est entretenu par un frottement continu.

Ce disque A, en ébonite ou en verre, qui passe entre deux coussins de cuir D, est porté directement sur l'axe de la manivelle M; une poulie montée sur le même axe communique, à l'aide d'une corde, une rotation beaucoup plus rapide à un autre disque en ébonite B d'un grand diamètre. En face de ce deuxième plateau sont deux peignes E et F, dont le second est opposé à une feuille d'ébonite fixe, munie d'armures terminées par des pointes et destinée à servir de deuxième inducteur, comme dans la machine de Holtz. Le peigne supérieur communique avec un conducteur isolé C et le peigne inférieur est aussi isolé ou communique avec le sol; une branche mobile T sert d'excitateur. On peut augmenter encore l'énergie des étincelles en réunissant les deux conducteurs aux deux armatures d'une bouteille de Leyde

formée d'un ballon à long col que l'on suspend à un anneau E par le crochet de l'armature intérieure. Cette machine est peu fragile ; elle se charge d'elle-même très-rapidement, donne beaucoup d'électricité et de longues étincelles. Son débit, sans être égal à celui des machines de Holtz de même diamètre, est supérieur à celui des appareils à frottement simple, et elle est prête à fonctionner immédiatement par tous les temps. Cependant le choix de l'ébonite pour faire le grand plateau présente quelques inconvénients, parce que cette substance perd peu à peu ses propriétés isolantes par l'action lente des agents atmosphériques,

Fig. 258.

et il est utile de renouveler de temps en temps les surfaces en les frottant avec du papier d'émeri.

857. **Quelques expériences relatives à la machine de Holtz.** — Pour mieux montrer le jeu des machines à réactions, comme celle de Holtz, et le parti que l'on peut tirer de ces instruments, nous indiquerons encore les dispositions qu'il convient d'adopter pour répéter les expériences générales d'électricité, et en même temps quelques phénomènes particuliers à ces nouvelles machines.

Ainsi, il est souvent utile d'avoir à sa disposition un conducteur électrisé à un potentiel très-élevé, comme les cylindres de la machine de Ramsden, afin d'électriser des corps de forme quelconque avec lesquels on le mettra en contact pendant un instant. La machine de Holtz ne paraît pas convenir alors, parce qu'il se produit entre les deux pôles des étincelles fréquentes, même lorsque les boules de l'excitateur sont le plus éloignées, de sorte que l'état électrique du corps étranger que l'on a mis en communication avec l'un des pôles est très-différent, suivant qu'on le retire un peu avant ou après la production d'une étincelle. Il faut donc empêcher ces décharges brusques, en ménageant quelque part des fuites d'électricité qui équilibreront le débit de la machine. On peut relier l'un des pôles avec le sol et mettre l'autre en communication avec une pointe plus ou moins aiguë; mais l'appareil permet une disposition plus simple. Il suffit d'enlever la petite boule qui termine la branche mobile de l'excitateur et d'écarter cette branche à une distance plus ou moins grande. Le pas de vis qui termine cette tige fait fonction de trop-plein électrique (481) et laisse échapper des aigrettes qui maintiennent une différence de potentiel constante entre les deux pôles. En isolant l'un ou l'autre, on aura ainsi à sa disposition un conducteur à un potentiel constant, positif ou négatif; quand on touchera, par exemple, celui des deux pôles qui reste isolé par le crochet d'une bouteille de Leyde que l'on tient à la main, on obtiendra sur cette bouteille, dans différentes expériences, une quantité d'électricité qui sera toujours sensiblement la même.

Nous avons vu (850) qu'une machine peut se décharger ou même s'intervertir quand l'excitateur est ouvert, surtout si les pôles communiquent avec les armatures d'une batterie de grande surface; on peut alors observer un phénomène curieux. Lorsque la batterie est fortement électrisée, on abandonne la machine à elle-même en faisant tomber la courroie qui commande les plateaux; on voit ces plateaux s'arrêter peu à peu, puis se mettre à tourner en sens contraire d'un mouvement accéléré, jusqu'à ce que la batterie soit déchargée. Si l'on pouvait enlever subitement les armures de papier, la décharge de la batterie pourrait entretenir la rotation du plateau dans un sens quel-

conque, par la répulsion qu'exercent les peignessur les points du verre où ils ont versé de l'électricité; mais les armures de papier se maintiennent électrisées, si les plateaux tournent dans le sens habituel, et s'opposent au mouvement, tandis qu'elles sont ramenées à l'état neutre et n'interviennent plus dans le phénomène quand la rotation est de sens contraire.

Ces expériences sont plus faciles à répéter avec deux machines. L'une d'elles étant ouverte et à l'état neutre, on met ses deux peignes en communication séparément avec les pôles d'une seconde machine en activité. Aussitôt les peignes de la première s'illuminent et le plateau se met à tourner en sens contraire de sa marche régulière ; l'une des machines dépense ce que l'autre produit. On peut dire encore, en se plaçant à un autre point de vue, que l'électricité sert alors à transmettre le mouvement de la seconde machine à la première.

Dans cette expérience, on peut remarquer que les deux machines sont réunies par leurs pôles de noms contraires, et que l'ensemble constitue un circuit qui est traversé dans un sens déterminé par un courant électrique continu.

Supposons maintenant que deux machines, marchant toutes deux dans le sens régulier, soient ainsi réunies par leurs pôles de noms contraires, le pôle négatif N de l'une avec le pôle positif P′ de la suivante, et le pôle négatif N′ de celle-ci avec le pôle positif P de la première. Dans ce cas, le débit d'électricité n'est pas modifié, puisque le courant passe par chacune des machines successivement, mais on peut obtenir une différence de potentiel beaucoup plus grande. Supposons, en effet, qu'on interrompe le conducteur N′P jusqu'à la distance limite de production des étincelles. La première machine établit entre les pôles P et N une certaine différence de potentiel V; le conducteur NP′ est à un potentiel sensiblement constant, et la seconde machine établit la même différence de potentiel V entre les pôles P′ et N′. Dans ce cas, la différence de potentiel entre les pôles P et N′ pourra être égale à 2V. J'ai obtenu ainsi des étincelles de 32 centimètres, en accouplant deux machines doubles dont chacune ne pouvait donner d'étincelles plus longues que 20 centimètres; il est utile alors de relier avec le sol le conducteur intermédiaire NP′, afin que les potentiels extrêmes se maintiennent égaux et de si-

gnes contraires. Malheureusement, l'isolement des différentes pièces de la machine n'est pas assez parfait pour que l'on puisse tirer un grand profit de cette disposition. Les plateaux mobiles laissent alors échapper des aigrettes de tous côtés, vers les bouteilles de condensation, les supports, les cordes de transmission, etc., de sorte que l'on est loin de doubler la différence de potentiel relative à chaque machine.

Enfin, on peut aussi réunir deux machines par leurs pôles de même nom ; on obtient ainsi deux systèmes de conducteurs entre lesquels la différence de potentiel est la même que pour une machine unique. Alors le jeu des appareils ne peut être entretenu que si les deux systèmes sont réunis par un conducteur ou par une série d'étincelles; la distance explosive n'est pas modifiée, mais le débit d'électricité est doublé. Les mêmes expériences pourraient être réalisées avec une machine électrique quelconque, telle qu'une machine de Nairne ou une machine de Ramsden à coussins isolés. Ces deux manières d'associer les appareils d'électricité statique correspondent exactement à la réunion des piles électriques en tension ou en quantité.

858. **Appareils de M. Thomson.** — L'influence électrique et les réactions réciproques ont servi de principe à la construction d'un assez grand nombre d'appareils; nous en indiquerons quelques-uns imaginés par M. Thomson [1].

Le reproducteur de charge qui a été décrit à propos de l'électromètre absolu (284) peut, avec quelques modifications destinées à augmenter le débit d'électricité, être transformé en une véritable machine électrique.

Une roue C (fig. 239) en ébonite porte un certain nombre de lames métalliques isolées, disposées en secteurs sur les deux faces et figurant à la circonférence comme des dents d'engrenage. Deux lames métalliques I et R, recourbées de façon à envelopper presque complétement la moitié de la roue (l'une d'elles est indiquée seulement par un pointillé), jouent en même temps le rôle d'*inducteur* et de *récepteur*, c'est-à-dire qu'elles agissent par influence sur un conducteur intermédiaire F et reçoivent ensuite, par l'effet du mouvement, l'électricité ainsi développée; il en ré-

[1] *Reprint of papers*, p. 330.

sulte que la charge de chacune d'elles augmente d'abord en progression géométrique, comme dans tous les appareils analogues. Pour cela, deux ressorts *récepteurs* i et r, communiquant séparément avec les enveloppes métalliques dans l'intérieur desquelles ils sont placés, reçoivent l'électricité apportée par les différents secteurs et la communiquent en totalité aux enveloppes correspondantes. Deux autres ressorts i' et r', dits *connecteurs*, placés à la suite des précédents dans le sens de la rotation de la roue, communiquent entre eux par un fil métallique F.

Supposons que l'un des inducteurs, I par exemple, soit d'abord chargé d'électricité négative; le ressort connecteur correspondant i' se charge d'électricité positive qu'il communique aux dents successives de la roue, lesquelles, par le ressort récepteur sui-

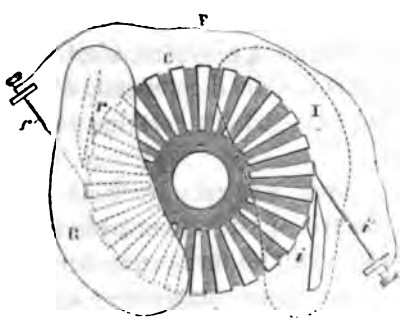


Fig. 239.

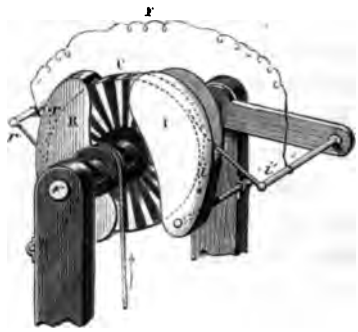


Fig. 240.

vant r, transmettent cette électricité au deuxième inducteur R. Le ressort connecteur opposé r' se charge de même d'électricité négative, qui revient ensuite par les secteurs et par le ressort récepteur i au premier inducteur I.

Dans l'instrument (fig. 240) construit par M. Thomson, la roue n'avait pas plus de 2 pouces de diamètre et pouvait être mise en mouvement par le moteur d'un télégraphe de Morse ; mais, quelques secondes seulement après la mise en train, il se produisait des aigrettes brillantes et des étincelles entre les différentes parties de l'appareil, même lorsque les inducteurs et les connecteurs avaient été réunis entre eux pendant plusieurs jours et déchargés avec le plus grand soin.

Une pile sèche de 40 éléments, dont les deux pôles étaient mis en communication séparément avec les deux inducteurs, suffisait pour charger la machine ou renverser subitement les signes électriques.

Cet appareil a servi à M. Thomson, par exemple, pour entretenir la marche constante d'une autre machine plus simple destinée à recueillir les signaux du câble transatlantique. Celle-ci était formée d'un inducteur I sans ressort récepteur, dans l'intérieur duquel était un ressort i' en communication avec le sol, et d'un récepteur R avec son ressort r. L'inducteur I étant maintenu à un potentiel constant, les dents de la roue se chargeaient d'électricité contraire, au contact du ressort i', et transportaient constamment cette électricité au récepteur R, dont la charge allait ainsi continuellement en croissant.

859. **Égaliseurs de potentiel.** — On rencontre dans toutes les machines électriques un même problème à résoudre, c'est d'amener deux corps au même potentiel ou, plus exactement, d'établir sur un conducteur le potentiel qui existe en certains points de la masse d'air qui l'environne.

Quand un corps conducteur, comme un cylindre isolé, est soumis à l'influence d'un corps électrisé positivement, placé en face de l'une de ses extrémités, ce cylindre forme une surface de niveau, et le potentiel varie plus ou moins rapidement quand on s'éloigne de la surface suivant différentes directions. En tous les points de la ligne neutre la dérivée du potentiel est nulle, puisque la densité électrique est nulle; ces points sont donc au même potentiel que les couches d'air qui les entourent. Si, par un procédé quelconque, on enlève la couche d'électricité négative, de façon que la ligne neutre, ou de densité nulle, passe par l'extrémité la plus rapprochée du corps influent, le cylindre tout entier atteindra un potentiel maximum, celui des couches d'air qui touchent cette extrémité. On obtient habituellement ce résultat dans les machines électriques par l'emploi des pointes; mais une pointe ne peut jamais être assez aiguë physiquement pour être absolument efficace au point de vue électrique, et elle conserve toujours une densité sensible d'électricité contraire à celle du corps influent. On peut arriver, par divers moyens, à rendre cette densité nulle.

Supposons, par exemple, dans le cas du cylindre considéré plus haut, que l'on touche l'extrémité la plus voisine du corps influent par un plan d'épreuve qu'on ramène à l'état neutre après l'avoir enlevé, et que cette opération soit répétée un grand nombre de fois ; il arrivera, au bout d'un certain temps, que ce plan d'épreuve aura soustrait du point touché toute électricité appréciable, comme l'eût fait une pointe infiniment aiguë ; si le corps influent est conducteur, le cylindre atteindra un potentiel maximum qui sera une fraction déterminée de celui du corps influent.

860. L'appareil suivant employé par M. Thomson pour certaines expériences d'électrométrie fonctionne ainsi comme une suite de contacts par un plan d'épreuve. Un disque d'ébonite C (fig. 241), tournant autour d'un axe vertical, porte un certain nombre de boutons ou de chevilles de métal sur lesquels s'appuient deux ressorts R et R′ en communication avec les deux électrodes d'un électromètre. Si l'un de ces ressorts est soumis à l'influence d'un corps électrisé, les boutons qui s'en détachent successivement emportent d'une manière continue l'électricité de signe contraire à celle du corps influent, jusqu'à ce que la densité électrique à l'extrémité du ressort soit nulle. Si les deux ressorts sont en même temps soumis à l'influence de deux conducteurs à des potentiels différents, l'équilibre sera atteint au bout d'un certain temps, et assez rapidement, parce que l'électricité enlevée à l'un des ressorts est portée sur l'autre ; la différence de potentiel des deux ressorts ou des deux électrodes de l'électromètre sera proportionnelle à celle des deux corps influents. Il suffit, par exemple, d'approcher de cet appareil, à la distance de plusieurs pouces, un cristal de tourmaline PN que l'on a échauffé et qu'on laisse refroidir (on

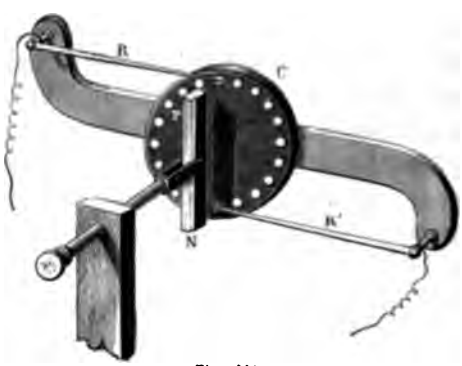


Fig. 241.

sait que, dans ces conditions, l'une des extrémités du cristal P devient positive et l'autre N négative), pour que, dans un électromètre dont la graduation permet d'apprécier la différence de potentiel de 3 éléments de Volta, la déviation de l'aiguille sorte des limites de l'échelle.

861. On conçoit d'ailleurs que des particules conductrices quelconques, des poussières métalliques, des gouttelettes liquides ou même un courant de gaz chauds, qui s'échapperaient du conducteur influencé, produiraient exactement le même effet que les contacts répétés d'un plan d'épreuve. C'est ainsi que s'explique l'efficacité des flammes, employées comme pointes électriques, et l'usage qu'on en a fait dans l'étude de l'électricité atmosphérique. Si un conducteur isolé est mis en communication avec une flamme placée dans l'air, les produits gazeux de la combustion laissent échapper de l'électricité jusqu'à ce que le potentiel de la flamme et du conducteur avec lequel elle communique soit égal au potentiel de la masse d'air qui entoure cette flamme. Le P. Beccaria, et après lui Volta, munissaient déjà la tige de leurs électroscopes d'une mèche enflammée, et la même méthode a été depuis renouvelée par M. Thomson. Toutefois, l'emploi d'une flamme présente quelques inconvénients, à cause de la nécessité de l'entretenir pendant un temps assez long, et à cause de l'électricité qui peut se produire par le fait même de la combustion. M. Thomson a résolu le même problème par un écoulement d'eau. Pour étudier l'électricité atmosphérique, par exemple, l'électromètre est mis en communication avec un vase isolé contenant une provision d'eau, qui s'échappe en petites gouttelettes par un tube conducteur; l'appareil tout entier est bientôt porté au potentiel des couches d'air situées à l'entour de l'orifice d'écoulement.

862. Dans le cas où le corps influent est conducteur, on peut se proposer d'établir sur le corps influencé un potentiel égal à celui du corps influent, sans les mettre en communication entre eux, et l'on y parviendra par la méthode des contacts successifs ou des écoulements. Il suffit, pour cela, que le point du corps influencé, dont se détachent des particules conductrices, soit enveloppé aussi complétement que possible par le corps influent; lorsque la densité électrique sera nulle en ce point, le potentiel

ne dépendra plus que de l'électricité répandue sur le conducteur influent et sera le même dans tout l'espace enveloppé. On aura alors réalisé un égaliseur de potentiel absolu.

Ainsi, dans la première machine de M. Thomson (fig. 239), si l'on suppose que le ressort *i* de l'inducteur I soit enlevé et le ressort *i'* mis en communication avec un conducteur isolé, le ressort *r'* supprimé et le récepteur R mis en communication avec le sol, et enfin l'inducteur I porté à un certain potentiel, les contacts enlèveront de l'électricité au ressort *i'* jusqu'à ce que le potentiel de ce ressort soit devenu égal à celui de l'inducteur. De même, dans la seconde machine (fig. 241), si les ressorts R et R' sont enveloppés séparément par des conducteurs A et A' entre lesquels existe une certaine différence de potentiels, l'appareil ne cessera de fonctionner que lorsque chacun des électrodes de l'électromètre aura atteint un potentiel égal à celui du conducteur influent qui lui correspond.

M. Thomson place encore une lampe à alcool en métal dans l'intérieur d'un cylindre vertical électrisé. Les gaz chauds qui s'échappent de la flamme amènent rapidement la lampe, et les conducteurs avec lesquels elle communique, au même potentiel que celui du cylindre influent. Enfin, l'écoulement d'un liquide produira exactement le même effet, et M. Thomson en a profité pour construire une machine électrique singulière.

Fig. 242.

863. **Machine électrique à écoulement.** — Concevons qu'un tube métallique T (fig. 242), communiquant avec le sol, soit placé dans l'intérieur d'un cylindre de métal I que nous appellerons l'*inducteur*, porté à un potentiel négatif; ce tube s'électrise positivement, et si on laisse échapper des gouttelettes liquides, elles emporteront de l'électricité contraire qui se reproduira indéfiniment. Ces gouttes tombent dans un autre cylindre de métal R, le *récepteur*, qui porte dans l'intérieur un entonnoir dont le bec s'ouvre au milieu du cylindre; l'électricité des gouttes se répand à la surface du récepteur, et elles s'écoulent ensuite à l'état neutre par le bec de l'entonnoir. La charge du récepteur augmente donc de plus en plus, jusqu'à ce que l'appoint électrique des nouvelles

gouttes soit équilibré par les pertes, ou bien qu'il se produise des étincelles entre les deux cylindres, ou encore que les gouttes électrisées qui s'échappent de l'orifice du tube T ne tombent plus dans le récepteur, parce qu'elles sont rejetées latéralement par la répulsion électrique qu'elles en éprouvent.

Dans les conditions actuelles, il est nécessaire d'entretenir le potentiel de l'inducteur I par une source étrangère; mais on

Fig. 243.

conçoit aisément que deux appareils semblables puissent être disposés de façon à réagir l'un sur l'autre et augmenter réciproquement leurs charges électriques. Il suffit, pour cela, que le récepteur R (fig. 243) du premier communique avec l'inducteur I' du second, et le récepteur R' du second avec l'inducteur I du premier; les gouttes qui tombent du second inducteur I' sont

alors chargées d'électricité négative que l'on recueille dans le récepteur R', lequel augmente la charge du premier inducteur I. M. Thomson réunit en outre les deux conducteurs séparément avec les armatures intérieures de deux bouteilles de Leyde A et B. Ces bouteilles sont formées de bocaux cylindriques en flint de Glascow garnies d'étain à l'extérieur et renfermant une certaine quantité d'acide sulfurique concentré; dans le liquide plongent des tiges de plomb terminées par des plaques de plomb à la partie inférieure. Ces tiges sont entourées de tubes de verre et passent à travers un couvercle en ébonite, de sorte que l'air absolument sec renfermé dans la bouteille n'éprouve pas d'échanges avec l'atmosphère. Si le verre est de bonne qualité, l'isolement de ces bouteilles peut être assez parfait pour que la perte électrique ne dépasse pas un centième de la charge en trois ou quatre jours.

Dans ces conditions, d'après M. Thomson, l'une des bouteilles étant électrisée à un potentiel assez faible pour n'être appréciable que par un électromètre très-délicat, on ouvre les robinets pour laisser écouler l'eau goutte à goutte; on voit alors ces gouttes se subdiviser en gouttelettes très-petites qui se séparent par leurs répulsions réciproques. Au bout de quelques minutes, il se produit en quelque partie de l'appareil une succession rapide d'étincelles, ou bien le liquide qui tombe n'entre plus dans les récepteurs. Les gouttes sont alors rejetées latéralement et produisent l'effet d'un tourbillon de neige, comme si elles étaient soustraites à la pesanteur; les unes remontent et s'appliquent à la surface extérieure des inducteurs, les autres décrivent des courbes bizarres et sont lancées à une assez grande distance. On évite en partie cet inconvénient en garnissant les récepteurs de tubes de verre qui forment entonnoirs.

La valeur dynamique de l'électricité ainsi produite provient de l'énergie du liquide qui tombe; elle serait égale au travail de la pesanteur sur les gouttes liquides pendant leur trajet, si ces gouttes arrivaient aux récepteurs avec une vitesse nulle, et elle correspond exactement à leur perte de force vive. La déperdition était tellement faible dans l'appareil de M. Thomson, qu'il pouvait rester électrisé pendant des années à l'aide d'un écoulement de liquide insignifiant; une seule goutte, par exemple, tom-

bant de chaque tube toutes les trois minutes, était suffisante pour maintenir la charge constante.

864. Il y a d'ailleurs une relation très-simple entre les constantes de la machine et le nombre des gouttes qui doivent s'écouler pendant l'unité de temps, pour que la charge électrique aille en augmentant à partir du début de l'expérience. Soient C et C′ les capacités électriques des deux conducteurs, y compris les armatures intérieures des bouteilles correspondantes, V et V′ leurs potentiels en valeurs absolues, m et m' les coefficients de déperdition, n et n' le nombre des gouttes qui tombent pendant l'unité de temps, c et c' les capacités électriques des gouttes de chaque système au moment où elles se détachent.

Pendant un temps infiniment petit dt, l'accroissement de charge du conducteur C est égal à l'excès de l'électricité apportée par les gouttes sur celle qui se perd; on aura donc, en admettant la loi de déperdition de Coulomb,

$$C dV = (n'c'V' - mV)\,dt,$$

ou bien

$$(1) \qquad C\frac{dV}{dt} = (n'c'V' - mV).$$

On aura, de même, pour l'autre conducteur C′,

$$(2) \qquad C'\frac{dV'}{dt} = ncV - m'V'.$$

En résolvant ces équations différentielles simultanées par la méthode ordinaire, on calculerait la valeur acquise par les potentiels V et V′ au bout d'un temps quelconque, en partant d'une valeur initiale donnée; mais il faudrait, pour cela, supposer que la loi de déperdition de Coulomb est toujours applicable et que l'écoulement est constant. Comme les charges deviennent rapidement très-grandes, le raisonnement est bientôt en défaut; on peut donc se borner à déterminer la condition nécessaire pour que la charge aille en croissant. Il faut alors que les dérivées des potentiels soient positives, ce qui donne

$$n'c'V' - mV > 0,$$
$$ncV - m'V' > 0;$$

on en déduit

$$\frac{m}{n'c'} < \frac{V'}{V} < \frac{nc}{m'},$$

ou bien

$$nn'cc' < mm'. \tag{3}$$

Si cette dernière condition est réalisée au début (et l'on voit qu'elle ne dépend pas de l'électrisation initiale), la charge de la machine ira en croissant jusqu'à ce qu'il se produise des étincelles, ou que les gouttes cessent de tomber dans les récepteurs. Si l'inégalité (3) avait lieu en sens contraire, la charge irait au contraire en diminuant et deviendrait rapidement nulle.

Si l'appareil est complétement symétrique, la condition d'accroissement de charge est simplement

$$nc < m. \tag{4}$$

Ce mode de raisonnement s'applique de la même manière à tous les multiplicateurs d'électricité à influences réciproques, comme le moulinet de Nicholson, la machine de Tœpler et les machines de Holtz. On remarquera peut-être que l'inégalité de condition (4) ne renferme pas les capacités des conducteurs, tandis que l'expérience montre que ces capacités jouent un rôle important; mais l'emploi des bouteilles de Leyde a surtout pour effet de diminuer le coefficient de déperdition m, de sorte que ces bouteilles interviennent ainsi d'une manière efficace dans le jeu des machines.

APPAREILS D'INDUCTION.

865. **Description.** — Les bobines d'induction ne sont pas des instruments d'électricité statique, si on les envisage au point de vue des principes sur lesquels elles reposent, mais elles produisent exactement les mêmes effets que les machines électriques ordinaires, avec lesquelles elles sont presque entièrement comparables. Ainsi, un appareil d'induction peut encore être défini par la quantité d'électricité qu'il débite pendant l'unité de temps

et par la différence maximum de potentiels qu'il permet d'établir sur deux conducteurs.

Rappelons qu'un appareil d'induction se compose d'une bobine de fil conducteur assez gros, dans lequel on fait passer le courant d'une pile, et d'une bobine de fil plus fin qui entoure la première, et dans laquelle se produit un courant d'induction toutes les fois que le courant principal est interrompu ou établi. Dans l'axe des bobines est un paquet de fils de fer qui s'aimantent ou se désaimantent, par l'établissement ou la suppression du courant dans la bobine inductrice, et augmentent l'énergie des courants induits. Si le fil induit est fermé, les deux courants induits, inverse et direct, se propagent tous deux et ne donnent pas d'effets d'électricité statique; mais, si le fil induit est interrompu par un intervalle suffisant, le courant direct, qui a plus d'intensité et une durée moindre, est seul capable de franchir l'interruption, de sorte que l'une des extrémités du fil induit donne de l'électricité positive, et l'autre de l'électricité négative; ce sont les deux *pôles* de la bobine.

Pour compléter l'appareil, il faut encore ajouter : 1° un interrupteur qui produit automatiquement les interruptions du courant inducteur; 2° un commutateur, qui permet de changer à volonté le sens du courant inducteur, et par suite, de permuter les pôles du fil induit; 3° un condensateur sur le fil inducteur, dont l'idée est due à M. Fizeau, qui augmente beaucoup la puissance des décharges.

Dans les bobines de petites dimensions, dont les étincelles ne dépassent pas 5 ou 10 centimètres, on n'emploie, en général, qu'une seule pile. Le courant qui vient de la pile passe d'abord par un commutateur dont le jeu est commandé par l'aimantation et la désaimantation du fer doux; c'est habituellement une lame vibrante par laquelle le circuit de la pile est fermé à l'aide de deux contacts en platine. Cette lame porte un morceau de fer qui est alors attiré par le noyau aimanté de la bobine; la lame s'infléchit, détache les contacts et rompt le circuit inducteur; l'attraction du noyau cesse alors, et la lame revient à sa position primitive où elle ferme le circuit, etc.

Dans les machines de plus grandes dimensions, alimentées par 8 ou 10 couples de Bunsen à grande surface, on fait marcher

l'interrupteur par une petite pile auxiliaire, et l'on produit l'interruption dans une couche d'alcool ou d'eau, entre une pointe de platine et un bain de mercure. Cette disposition, qui est due à Foucault, donne une rupture du courant plus brusque et des étincelles faibles, tandis que si l'interruption avait lieu dans l'air entre des pièces métalliques, les étincelles ne tarderaient pas à détériorer les surfaces et à empêcher toute marche régulière.

La figure 244 représente l'ensemble d'une grande bobine d'induction. Les deux fils C et D, mis en communication avec une pile de 2 éléments, commandent un petit électro-aimant qui fait

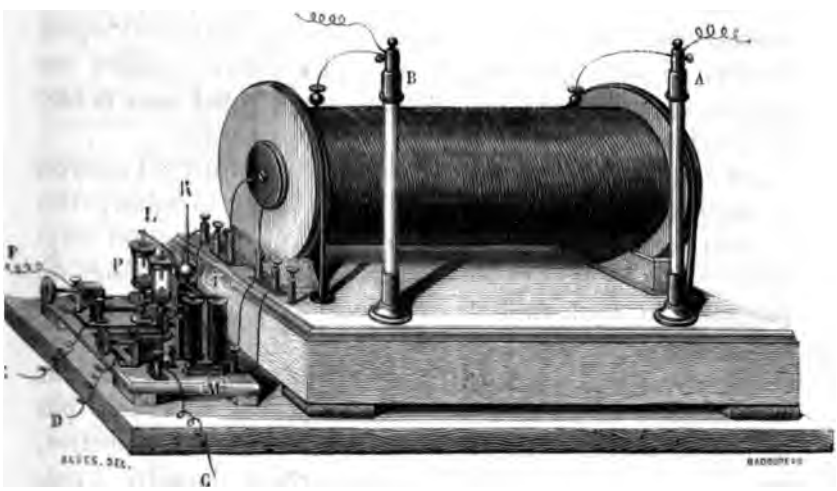


Fig. 244.

osciller l'interrupteur destiné à ouvrir et fermer le circuit principal. Les deux fils E et F communiquent avec une pile composée d'une dizaine de couples de Bunsen. Enfin les deux extrémités du fil induit sont reliées à deux pièces métalliques A et B portées par des pieds en verre; on met ces deux pôles en communication par des fils avec les appareils sur lesquels on veut provoquer les décharges.

Au moment où se produit la décharge d'induction, il s'établit entre les extrémités du fil induit une différence de potentiel considérable; comme l'induction s'exerce sur toute la longueur du fil, le potentiel à ce moment varie d'une manière continue

d'un pôle à l'autre. Dans les bobines ordinaires, le fil induit forme plusieurs couches successives superposées les unes aux autres et séparées par des substances isolantes. Avec cette disposition, certaines portions du fil dont les potentiels sont très-différents se trouvent très-rapprochées, et il peut s'y produire des décharges au travers des matières isolantes interposées. Pour éviter ces décharges intérieures qui limitent bientôt les étincelles que l'on peut obtenir entre les pôles, on a imaginé depuis quelques années de cloisonner la bobine induite. On divise cette bobine dans sa longueur en un certain nombre de parties par des cloisons en verre; chaque région est remplie par plusieurs couches successives du fil induit qui passe ensuite dans la région voisine, de sorte qu'il n'existe entre les différents points des couches superposées qu'une différence de potentiel assez faible, et l'on risque moins de percer les matières isolantes.

Les grandes bobines que construit M. Ruhmkorff ont environ 60 centimètres de longueur et 120 kilomètres de fil induit; elles peuvent donner des étincelles de 45 centimètres. L'Institut polytechnique de Londres (1) possède une bobine qui a 3 mètres de longueur; le noyau en fil de fer pèse 46 kilogrammes, il est entouré d'un fil inducteur de 3450 mètres de longueur qui pèse 54 kilogrammes. Le fil induit a 241 kilomètres de longueur sur un diamètre de $\frac{4}{10}$ de millimètre. La bobine est excitée par 40 couples Bunsen; elle donne des étincelles de 74 centimètres, qui paraissent avoir près de 2 centimètres de diamètre et percent 127 millimètres de verre. Trois étincelles suffisent pour charger une batterie de 40 pieds carrés.

866. **Caractères des bobines d'induction.** — Nous avons vu (456) que la décharge des bobines d'induction présente des caractères particuliers. A l'ouverture ou à la fermeture du courant inducteur, les extrémités du fil induit prennent d'abord une différence de potentiel croissante, qui passe par un maximum, diminue ensuite, puis change de signe et éprouve, en définitive, une série d'oscillations sensiblement isochrones qui s'éteignent peu à peu. M. Berstein a manifesté ces oscillations en fermant le circuit induit au bout d'intervalles de temps croissants, à partir

(1) *Pogg. Annalen*, t. CXXXVI, p. 636. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série. t. XVII, p. 509.

du moment où le circuit inducteur est ouvert ou fermé, et obtenu ainsi des courants alternativement de sens contraires.

M. Mouton (1) a observé le même phénomène en reliant les extrémités du fil induit à un électromètre, afin de déterminer directement les différences de potentiel qui correspondent aux états successifs de l'appareil, et constaté les mêmes oscillations. Dans tous les cas, la première oscillation est celle qui a la plus grande intensité et qui est dominante, surtout lorsque le circuit est interrompu; mais la détermination de la différence des potentiels par les méthodes ordinaires est impraticable pour les appareils très-puissants, et l'on ne peut guère recourir à d'autre moyen que la mesure des distances explosives.

On peut ainsi vérifier, par expérience, que l'induction établit entre les deux pôles une différence de potentiel déterminée, indépendante du potentiel absolu de chacun d'eux. Ainsi, avec une bobine de petites dimensions, j'ai constaté, par exemple, que la distance explosive maximum, entre une pointe positive et un plateau négatif, était de 5 centimètres. Cette distance explosive n'était pas modifiée quand on mettait en communication avec le sol la pointe ou le plateau, et même, dans ce dernier cas, elle paraissait un peu augmentée. Lorsque les deux pôles étaient terminés en pointe, la communication de l'un d'eux avec le sol diminuait un peu la distance explosive maximum, mais d'une quantité insignifiante.

La même expérience ne réussirait pas avec les bobines de grandes dimensions, parce que ces appareils ne sont pas suffisamment isolés. Quand on met l'un des pôles en communication avec le sol, le potentiel de l'autre pôle tend à doubler; il se produit alors des étincelles de toutes parts entre l'extrémité correspondante de la bobine et les corps voisins.

867. **Association des bobines.** — Cette propriété des décharges d'induction conduit à une application importante. Supposons que différentes bobines soient disposées de telle façon que l'interruption du courant inducteur se produise dans toutes simultanément, et réunissons ces bobines en *tension*, c'est-à-dire le pôle positif de la première avec le pôle négatif de la seconde, le

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXII, p. 84.

pôle positif de celle-ci avec le négatif de la suivante, et ainsi jusqu'à la dernière. La différence des potentiels des pôles extrêmes sera alors égale à la somme des différences relatives à chacune des bobines et, par conséquent, proportionnelle au nombre des bobines réunies.

En fait, c'est la combinaison réalisée dans les bobines cloisonnées, où un même courant inducteur agit simultanément sur diverses bobines successives ajoutées bout à bout. Foucault [1] associait ainsi 4 bobines différentes alimentées par la même pile et commandées par le même interrupteur. Dans ce cas, on peut faire passer le courant de la pile successivement par les diverses bobines inductrices; mais il paraît plus avantageux, pour la parfaite simultanéité des effets, de diviser le courant principal en 4 dérivations qui se rendent séparément dans les différentes bobines et se réunissent ensuite en retournant à la pile. Si les bobines d'induction sont groupées en tension, on obtient avec le même débit d'électricité une différence de potentiel 4 fois plus grande. Au contraire, si l'on réunit ensemble tous les pôles de même nom, le débit deviendra 4 fois plus grand, sans que la différence de potentiel soit modifiée. C'est cette disposition qu'il faudra employer, par exemple, pour charger rapidement une batterie de grande surface.

868. **Mesure du débit.** — La détermination du débit ne présente pas de difficultés. Pour cela, on met les deux armatures d'une batterie isolée en communication avec un excitateur dont les branches sont séparées par une certaine distance d; l'armature extérieure de la batterie communique en même temps avec l'un des pôles de la bobine, et la communication de l'armature intérieure avec l'autre pôle est interrompue par une distance plus grande D, que les étincelles doivent franchir. Cette distance explosible est nécessaire à maintenir, sans quoi les deux courants induits de sens contraires passeraient également, et les armatures de la batterie étant réunies par le fil induit ne pourraient conserver leurs charges. A chaque étincelle de la bobine, la batterie reçoit une certaine quantité d'électricité; au bout d'un certain temps, la batterie se décharge par l'excitateur. Le même phé-

[1] Gavarret, *Traité d'électricité*, t. II, p. 314.

nomène se reproduisant d'une manière continue, on peut déterminer la moyenne du nombre n des étincelles nécessaires pour provoquer la décharge de la batterie.

Cette expérience donne lieu à plusieurs observations.

1° La distance explosive D de la bobine doit toujours être notablement plus grande que la distance d à laquelle se décharge la batterie. En effet, le passage de l'étincelle augmente beaucoup la conductibilité de la première interruption D et, si la distance des boules de l'excitateur n'est pas assez faible, il arrive un moment où la batterie se décharge par le fil induit lui-même, en franchissant la distance explosive D au moment où se produit une étincelle de la bobine; on voit alors cette étincelle s'élargir et s'entourer d'une auréole lumineuse. Si un électromètre de Henley est installé sur l'armature intérieure de la batterie, le pendule s'abaisse immédiatement.

2° Les interruptions du courant inducteur ne doivent pas se succéder trop rapidement, sans quoi la distance explosive est considérablement diminuée et la quantité d'électricité qui correspond à chacune des étincelles décroît aussi rapidement. Pour une distance explosive donnée, il y a une vitesse d'interruption qui fournit le débit maximum pendant l'unité de temps, et une autre vitesse plus faible à partir de laquelle le débit relatif à chacune des étincelles reste constant. Si l'on maintient la vitesse d'interruption au-dessous de cette dernière limite, on vérifie que le nombre des étincelles nécessaires pour provoquer la décharge de la batterie à une distance constante est toujours le même; on vérifie aussi que ce nombre d'étincelles est proportionnel à la capacité de la batterie et à la distance des boules de l'excitateur, tant que cette distance, tout en restant très-faible par rapport à la distance explosive D de la bobine, est comprise entre les limites pour lesquelles elle est proportionnelle à la différence des potentiels.

3° Quand on augmente la distance explosive D, le débit d'électricité pour chacune des étincelles diminue rapidement.

Voici quelques expériences d'après lesquelles on verra bien quelle est la marche du phénomène. La bobine était alimentée par 8 grands éléments Bunsen et pouvait donner des étincelles dans l'air, à la distance de 37 centimètres, entre une pointe posi-

tive et un plateau négatif. La distance explosive D était produite entre deux boules de 2 centimètres de diamètre, et les boules de l'excitateur étaient d'environ 3 centimètres ; la batterie était formée par 6 grandes jarres ; enfin les interruptions étaient obtenues à la main, et assez lentement pour que l'on eût à ce point de vue le débit maximum :

DISTANCES EXPLOSIVES		NOMBRE DES DÉCHARGES		$P = \frac{N}{nd}$	$\frac{D}{P}$
DE LA BOBINE D	DE L'EXCITATEUR d	BOBINE N	EXCITATEUR n		
240mm	2mm	100	15	3,3	72
	4	104	8	3,2	
	6	107	5	3,5	
	8	116	4	3,6	
200	2	100	20	2,5	80
	4	102	10	2,5	
	6	100	6	2,8	
	8	116	5	2,9	
	10	124	5	2,5	
125	2	40	12	1,7	75
	4	50	7	1,8	
	6	63	5	2,1	
	8	107	6	2,2	
	10	»	refus.	»	
80	1	50	42	1,2	64
	3	100	26	1,3	
	4	103	20	1,3	
	5	104	16	1,3	
	6	»	refus.	»	
55	1	50	51	0,98	55
	3	50	17	0,98	
	4	53	13	1,01	
	5	50	8 à 10	1,25 à 1	
20	1,6	1	1	0,62	32

L'avant-dernière colonne indique le rapport du nombre des étincelles de la bobine, pour une décharge de batterie, à la distance explosive correspondante de l'excitateur ; ce rapport va en

croissant dans toutes les séries avec la distance explosive, bien que celle-ci soit plus rapidement croissante que la différence des potentiels; il en résulte que le débit relatif à chaque étincelle de la bobine diminue d'une manière sensible, quand la différence des potentiels de la batterie augmente.

La batterie refuse de se décharger par l'excitateur, si la distance des boules atteint le $\frac{1}{12}$ de la distance explosive de la bobine. Les expériences deviennent irrégulières quand on approche de cette limite, et une partie de la décharge s'effectue par le fil induit; on le reconnaît à l'auréole qui entoure de temps en temps les étincelles de la bobine.

Enfin, la dernière colonne montre que le débit d'électricité fourni par la bobine est, entre certaines limites, en raison inverse de la distance explosive, car la fraction $\frac{1}{p}$ est proportionnelle à la quantité d'électricité relative à chaque étincelle; en dehors de ces limites, qui sont ici de 10 à 24 centimètres, le débit varie suivant une loi plus rapide.

869. On peut encore déterminer l'influence de diverses autres circonstances, telles que l'intensité du courant inducteur et la rapidité des interruptions.

Le débit et la distance explosive augmentent avec l'intensité du courant inducteur, mais on ne peut pas trop accroître l'énergie de la pile, parce qu'on s'exposerait à provoquer des décharges entre les différents spires du fil induit dans l'intérieur de la bobine; l'appareil serait alors gravement endommagé. Il y a beaucoup moins d'inconvénients à forcer l'intensité du courant, si l'on offre un chemin peu résistant à l'écoulement de l'électricité induite; c'est ce qui a lieu, par exemple, quand on dispose un condensateur entre les deux extrémités du fil induit, comme nous l'indiquerons plus loin.

Avec la bobine dont il vient d'être question, on ne pouvait pas produire utilement, pour les grandes distances explosives, plus de cinq ou six étincelles par seconde. Cela tient à ce que les courants d'induction sont loin d'être instantanés, surtout à cause de l'aimantation des noyaux de fer doux qui exige toujours un certain temps pour s'établir et disparaître. Quand les interruptions sont trop rapides, les courants induits successifs se

superposent partiellement; l'aimantation du fer doux est alors incomplète, et le débit d'électricité diminue sensiblement.

Je citerai encore quelques expériences dans lesquelles, en modifiant la vitesse des interruptions et la distance explosive de la bobine, on a déterminé par tâtonnements le maximum du nombre des décharges que l'on pouvait obtenir d'une batterie à une distance donnée. On a obtenu ainsi, en rapportant les expériences à une durée d'une minute :

NOMBRE DES DÉCHARGES DE LA BATTERIE m	DISTANCE DES BOULES DE L'EXCITATEUR d	md	$md \times d^2$
75	4^{mm}	300	4800
10,7	8	85,6	5500
2,75	12	33	4700

Comme la charge de la batterie est à peu près proportionnelle à la distance explosive, le produit md représente le débit d'électricité pendant l'unité de temps. On voit que ce débit diminue rapidement, à mesure que la différence de potentiel que l'on veut établir sur la batterie va en croissant; il semble même résulter des nombres de la dernière colonne, que le débit varie à peu près en raison inverse du carré de la distance explosive, ou de la différence des potentiels.

On conçoit, d'après cela, que le choix d'une bobine d'induction dépend beaucoup des expériences que l'on a en vue; il peut arriver, par exemple, pour des expériences à petite distance explosive, comme dans les appareils à effluves électriques, que le plus grand débit qui correspond à chaque étincelle d'une bobine très-puissante soit compensé par la lenteur relative des interruptions, et qu'une autre bobine moins puissante, mais comportant des interruptions rapides, donne en définitive une plus grande quantité de travail. Dans les cas analogues, il faut chercher surtout à accélérer les interruptions.

870. **Rôle des condensateurs sur le fil induit.** — Les observations qui précèdent permettent maintenant de concevoir le

rôle des condensateurs placés sur le trajet du fil induit, comme dans les expériences de Masson (540). La quantité d'électricité induite qui correspond à chaque interruption du courant inducteur est limitée. Quand on veut obtenir une longue étincelle, on met les pôles de la bobine en communication avec des corps de capacité très-faible, comme des fils de métal, de manière à établir entre eux la plus grande différence de potentiel possible. Si alors on rapproche ces conducteurs à une distance plus faible, la décharge débute avant que le courant induit ait fourni toute son électricité. Indépendamment de toute autre cause, cette décharge doit donc être composée, comme elle l'est en effet, de plusieurs décharges partielles successives, dont chacune correspond à une faible quantité d'électricité ; la durée totale du phénomène doit aussi augmenter à mesure que la distance explosive diminue, et l'énergie de chacune des décharges partielles devient de plus en plus faible. On peut se proposer au contraire de récolter, à chaque interruption du courant inducteur, la plus grande quantité d'électricité possible par une seule décharge ; pour cela, on met les deux armatures d'un condensateur de très-grande surface en communication avec les extrémités du fil induit. La différence de potentiel de ces armatures ne pourra atteindre qu'une valeur plus faible, mais si elles communiquent avec un excitateur à branches assez rapprochées l'une de l'autre, toute la charge électrique du courant induit s'y dépensera brusquement. D'autre part, le débit de la bobine augmente à mesure que la distance explosive diminue, de sorte que l'on obtiendra ainsi, par le gain d'électricité, des étincelles très-courtes qui correspondront à une grande énergie.

Il y a même lieu de poser le problème d'une manière plus générale. Étant donnée la distance explosive, on peut se proposer de déterminer la capacité électrique du condensateur qui correspondra au travail maximum de la décharge. Les batteries ordinaires ne conviennent pas pour cet objet, parce qu'elles ne tolèrent pas une différence de potentiel assez grande ; il faut avoir recours à l'emploi des cascades, comme l'a remarqué M. Cazin (1). Si la cascade renferme un grand nombre de bouteilles,

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LVII, p. 98.

sa capacité sera très-faible, la quantité d'électricité correspondant à chacune des décharges sera faible, et l'on n'aura pas sensiblement modifié les effets de la bobine. En diminuant le nombre des bouteilles, on augmente la capacité électrique de la cascade et on diminue la distance explosive maximum; les étincelles sont alors beaucoup plus éclatantes, elles ont l'apparence d'un paquet de traits lumineux qui paraissent simultanés, mais qui sont produits en réalité par des décharges successives.

On peut d'ailleurs remplacer la batterie de bouteilles en cascade par un conducteur quelconque qui aurait sensiblement la même capacité électrique. Guillemin [1] a constaté, en effet, que l'étincelle acquiert un éclat beaucoup plus grand, en même temps que la distance explosive diminue, lorsqu'on met les deux pôles de la bobine en communication avec de grandes surfaces métalliques isolées, ou même encore avec des rubans ou de longs fils de métal.

COMPARAISON DES DIFFÉRENTES MACHINES ÉLECTRIQUES.

871. **Circonstances qui influent sur le débit d'électricité.** — Nous avons établi que, pour les machines à frottement ou les machines à réactions comme celles de Holtz, le débit d'électricité est proportionnel à la vitesse de rotation, les autres conditions restant les mêmes; mais on conçoit bien que ce débit ne peut pas être en toute rigueur indépendant de l'état électrique des conducteurs. Dans une machine à frottement parfaite au point de vue théorique, c'est-à-dire dans laquelle le plateau devient neutre après avoir passé en face des conducteurs, et où toute cause de déperdition est supprimée, le débit doit être constant jusqu'à ce que la différence des potentiels du conducteur et des coussins soit capable de provoquer une décharge entre ces deux corps; après quoi le débit continue sans modification. En fait, il n'en est pas ainsi; le débit diminue d'une manière sensible à mesure que le potentiel du conducteur va en augmentant, et cette diminution est surtout manifeste quand le conducteur n'est pas terminé

[1] *Journal de Physique*, t. II, p. 129.

par une mâchoire qui enveloppe aussi complétement que possible le plateau électrisé.

Pour mettre ce résultat en évidence, il suffit de relier le conducteur de la machine avec le sol, par l'intermédiaire d'une bouteille de Lane dont on fait varier la distance explosive, et de compter le nombre des décharges de la bouteille pour un nombre déterminé de tours de plateau. Voici, par exemple, une série d'expériences exécutées avec une machine de Ramsden :

DISTANCE EXPLOSIVE d	NOMBRE DE DÉCHARGES PAR TOUR DE ROUE n	PRODUIT nd	DIFFÉRENCE DE POTENTIEL V	DÉBIT RÉEL nV
1mm	1,6	1,6	1	1,6
2	0,7	1,4	2	1,4
4	0,32	1,28	4	1,28
6	0,22	1,32	5,8	1,27
8	0,15	1,2	6,7	1,0
10	0,145	1,45	8,3	1,2
15	0,094	1,41	10,3	0,97
20	0,061	1,22	11,8	0,72

Le produit du nombre des décharges par la distance explosive diminue d'une manière très-lente, ce qui indiquerait un débit presque constant, si la charge nécessaire pour provoquer une étincelle dans la bouteille de Lane était proportionnelle à la distance explosive, mais on a vu (479) que la charge croit moins rapidement; le débit réel de la machine est proportionnel au produit du nombre des décharges par la différence de potentiel nécessaire pour les provoquer. Les nombres de la dernière colonne ainsi calculés montrent, sauf quelques irrégularités, que le débit va en diminuant d'une manière sensible.

Le même caractère se vérifie dans toutes les machines à frottement, mais la diminution de débit est quelquefois beaucoup plus rapide. J'ai comparé ainsi des machines différentes, dont les coussins étaient tous garnis de la même manière et préparés avec assez de soin pour que chacune d'elles parût produire son maximum d'effet. Les nombres du tableau indiquent le produit

de la distance explosible par le nombre des décharges pour un tour de plateau ou de cylindre :

DISTANCE EXPLOSIVE	MACHINES RAMSDEN			VAN MARUM	NAIRNE
	I	II	III		
mm.					
0,5	2,6	2	4,5	5	0,5
1	2,5	1,9	4,6	3,6	0,56
2	2,3	2	4,3	3,2	0,58

On voit par ces exemples, qu'il est inutile de multiplier, que la comparaison de deux machines à frottement ne peut être faite d'une manière absolue, et que le rapport des débits peut être très-différent suivant que la distance explosive que l'on veut vaincre varie, même entre des limites très-restreintes.

872. Les machines à réactions paraissent avoir une marche plus uniforme. C'est ce que montrent les expériences suivantes où l'on a indiqué encore le produit du nombre des décharges pour un tour de plateau par la distance explosive :

DISTANCE EXPLOSIVE	MACHINE HOLTZ DOUBLE		MACHINE HOLTZ SIMPLE	MACHINE CARRÉ
	AVEC BOUTEILLES	SANS BOUTEILLES		
2mm	2,38	2,78	1,30	0,41
3	2,31	2,68	1,25	0,40
4	2,28	2,56	1,30	0,42
5	2,29	2,55	1,26	0,41
6	2,28	2,68	1,24	0,41
10	2,32	2,60	1,27	0,40
15	2,55	2,62	1,28	0,41
20	2,60	2,80	»	»
DÉBIT. 2mm	2,28	2,78	1,20	0,41
DÉBIT. 5	2,24	2,50	1,24	0,40
DÉBIT. 10	1,95	2,16	1,05	0,34
DÉBIT. 20	1,53	1,65	»	»

La présence des bouteilles en cascade sur la machine paraît diminuer un peu le débit; cela tient uniquement à ce qu'elles augmentent la capacité des conducteurs. Les quatre dernières lignes indiquent le débit réel pour quelques distances explosives; ce débit diminue moins vite qu'avec les machines à frottement.

873. L'emploi de la bouteille de Lane présente quelques inconvénients, parce que cette bouteille ne tolère que des différences de potentiel assez faibles et que, pour une distance explosive un peu grande, il se produit entre les armatures des fuites qui contribuent à exagérer la diminution apparente du débit des machines. On obtient des résultats plus réguliers en remplaçant la bouteille de Lane par une cascade; on reconnaît alors que, pour un même nombre de tours de plateau, le produit du nombre des décharges par le potentiel correspondant diminue à mesure qu'on augmente la distance explosive.

Enfin, on peut encore employer une disposition expérimentale identique à celle qui a été indiquée plus haut pour les bobines (845), en interrompant par une distance explosive plus ou moins grande la communication de l'un des pôles de la machine avec une des armatures de la batterie. Pour éviter alors les décharges irrégulières (812), il suffit de produire l'interruption entre des conducteurs de petit diamètre, afin que l'écoulement d'électricité se fasse par une série continue d'aigrettes; on constate encore aisément que le nombre de tours de la machine nécessaire pour provoquer la décharge de la batterie augmente rapidement à mesure que la distance explosive auxiliaire devient elle-même plus grande.

Telles sont les expériences suivantes, où la vitesse de rotation de la machine était constante :

DISTANCE EXPLOSIVE		NOMBRE DE DÉCHARGES DE LA BATTERIE PAR MINUTE
DE LA MACHINE	DE L'EXCITATEUR	
12mm	1mm	140
20	Id.	50
30	Id.	30

Il suffit, d'ailleurs, d'écouter le bruissement d'une machine de Holtz, ou d'examiner le peigne qui laisse échapper la nappe positive, pour s'assurer d'une manière très-simple que le débit diminue, lorsque la différence du potentiel des deux conducteurs croît au delà d'une certaine valeur.

874. **Évaluation du débit par les galvanomètres.** — Quand on fait communiquer le conducteur d'une machine de Ramsden avec le sol par l'intermédiaire d'un galvanomètre, on remarque que la déviation de l'aiguille, pour une vitesse déterminée du plateau, reste toujours constante, même si l'on introduit sur le trajet de la communication des résistances formées par des fils métalliques très-fins ou des cordes mouillées, d'une longueur quelconque. La même chose a lieu quand le galvanomètre est placé entre les deux conducteurs d'une machine de Nairne. Cette propriété, signalée déjà par Ampère et Gauss, et vérifiée récemment par M. Poggendorf au moyen d'expériences faites sur le courant produit entre les deux pôles de la machine de Holtz, a fait considérer quelquefois les machines électriques comme des électromoteurs dans lesquels le développement de l'électricité est indépendant de la résistance du circuit, par opposition avec ce qui a lieu pour les piles ordinaires.

D'après ce que nous avons vu, cette proposition ne peut pas être exacte en toute rigueur. Le débit des machines n'est pas modifié d'une manière appréciable par une interruption de plusieurs millimètres; or, une pareille couche d'air offre déjà une résistance énorme par rapport à celles que l'on peut obtenir à l'aide de conducteurs médiocres, comme des cordes de chanvre. Il n'est donc pas étonnant que de telles résistances, qui paraissent considérables, il est vrai, si on les compare à celles des fils métalliques, mais qui sont très-faibles par rapport à celles que peuvent vaincre les décharges des machines, ne produisent pas de modification appréciable dans le débit, quand on l'évalue au moyen d'un galvanomètre.

M. Rossetti (1) a appliqué de nouveau cette méthode à l'étude de la machine de Holtz. Il a constaté d'abord par des mesures exactes que l'intensité du courant est à peu près proportionnelle

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 5e série, t. IV, p. 214.

à la vitesse de rotation, mais qu'en réalité elle croît un peu plus rapidement. D'autre part, en employant des résistances beaucoup plus grandes, comme des tubes capillaires remplis d'eau distillée, l'intensité du courant, pour une même vitesse de rotation, a varié à peu près en raison inverse de la résistance du circuit ajouté et d'une quantité constante, laquelle représenterait la résistance propre de la machine si l'on compare cet appareil aux courants des piles électriques.

875. **Débit comparé de différentes machines.** — Pour comparer les débits de différentes machines il faut donc bien préciser les conditions dans lesquelles on opère. Les résultats que nous allons donner ont été obtenus par une même bouteille de Lane dont la distance explosive a été maintenue à 1 millimètre, et toutes les machines ont été mises en état de façon à donner à peu près le maximum de rendement. Nous prendrons pour unité la quantité d'électricité produite par la première machine de Ramsden.

Le frottoir étant toujours plus grand que le peigne (ou le conducteur de forme quelconque destiné à récolter l'électricité), on ne peut considérer comme surface utile du verre électrisé (plateau ou cylindre) que celle qui, après avoir été frottée, passe en face du collecteur. On peut s'assurer que, dans la plupart des machines, les mâchoires sont trop courtes, au moins par rapport à la longueur des coussins ; les constructeurs ont voulu éviter sans doute, aux dépens du débit, les étincelles rayonnantes qui s'échappent des mâchoires vers l'axe de rotation, quand ce dernier n'est pas isolé.

Pour comparer la surface utilisée à chaque tour de plateau dans les différents modèles, il faut remarquer encore que, si la machine a deux paires de coussins, les faces du verre sont frottées chacune deux fois, de sorte que l'on doit multiplier par 4 la surface de la couronne qui correspond à la longueur du peigne. Dans la machine de Nairne, au contraire, la surface n'est frottée qu'une fois, puisqu'il n'y a qu'un coussin. Dans les machines de Holtz et autres semblables, nous compterons encore les deux faces du plateau, bien que les peignes ne soient que d'un côté, mais une fois seulement, parce que l'un des peignes joue le rôle de coussin et l'autre de collecteur. On obtient ainsi :

MACHINES	DIAMÈTRE	LONGUEUR DU PEIGNE	DÉBIT PAR TOUR	SURFACE UTILISÉE	DÉBIT PAR UNITÉ DE SURFACE
	m.	m.		mq.	
I. Ramsden à mâchoires . . .	0,98	0,20	1	2,56	0,42
II. Id. plus grande	1,62	0,27	1,70	4,34	0,39
III. Id. à cylindres collecteurs. .	0,98	0,20	1	2,36	0,42
IV. Van Marum. .	0,85	0,15	1,40	1,74	0,80
V. Nairne.. . . .	0,52	0,30	0,18	0,30	0,60
VI. Holtz ordinaire.	0,55	0,14	0,45	0,36	1,25
VII. Holtz à 2 plateaux. . . .	0,55	0,14	0,86	0,72	1,20
VIII. Holtz à rotations inverses. . .	0,30	0,09	0,23	0,24	0,97
IX Carré à plateau d'ébonite. . .	0,50	0,13	0,21	0,29	0,72

Ce tableau donne lieu à plusieurs observations.

Les résultats ne conviennent qu'à la distance explosive d'un millimètre. Quand on augmentait cette distance, la machine de Van Marum et la machine de Nairne perdaient rapidement leurs avantages, tandis que les machines de Holtz gardaient beaucoup mieux la constance du débit.

Les trois machines de Ramsden sont à peu près équivalentes; les avantages que présentent les deux suivantes paraissent dus simplement à la qualité du verre. On remarquera encore que la machine de Nairne, malgré son faible débit en valeur absolue, se trouve être plus avantageuse que les trois premières quand on évalue le rendement par rapport à la surface frottée. Enfin, il est manifeste que les machines à réactions produisent beaucoup plus d'électricité; cette supériorité se conserverait même encore si l'on avait compté deux fois les deux surfaces de chaque plateau, comme dans les machines de Ramsden.

876. Cependant les nombres qui précèdent ne représentent pas la valeur relative des différentes machines, parce que ces appareils ne comportent pas la même vitesse de rotation. Les machines à frottement dont le plateau ne dépasse pas 1 mètre font facilement un tour à la seconde; la machine de $1^m,62$ ferait

difficilement plus de 40 tours à la minute, et un homme suffit à peine pour lui communiquer une pareille vitesse; on a de même indiqué pour les autres machines, dans le tableau suivant, des vitesses qu'il y aurait inconvénient à dépasser.

Sur ces bases, on peut comparer entre eux tous les électromoteurs, quel que soit le principe sur lequel ils reposent. La machine d'Armstrong avait 3 becs d'échappement et marchait à la pression de 4 atmosphères environ. La bobine d'induction, alimentée par 8 grands éléments Bunsen, pouvait donner des étincelles de 38 centimètres; on l'a employée à charger une batterie en prenant une distance explosive de 20 centimètres, de sorte qu'elle ne pouvait y établir une différence de potentiel capable de provoquer une étincelle à plus de 15 millimètres. Dans ces conditions, chaque étincelle de la bobine fournissait à peu près la même quantité d'électricité que 5 tours de plateau de la machine de Holtz; comme la bobine donnait 6 décharges au plus par seconde, on voit qu'elle équivalait à 3 machines de Holtz.

MACHINES	NOMBRE DE TOURS PAR SECONDE	RENDEMENT PAR SECONDE	RENDEMENT PAR UNITÉ DE SURFACE UTILE
I. Ramsden à mâchoires.. .	1	1	0,42
II. Id. plus grande.. .	0,67	1,14	0,26
III. Id. à cylindres. . .	1	1	0,42
IV. Van Marum.	1	1,4	0,80
V. Nairne.	2	0,56	1,20
VI. Holtz ordinaire.	10	4,5	12,8
VII. Id. à 2 plateaux.. . .	10	8,6	12,3
VIII. Id. à rotations inverses.	10	2,5	9,7
IX. Carré à plateau d'ébonite.	10	2,1	7,2
X. Armstrong.	»	2,4	»
XI. Grande bobine d'induction	»	13	»

Ce tableau montre bien, même si l'on s'en tient au rendement brut par unité de temps et sans évaluer de travail dépensé, la supériorité des machines actuelles. On voit encore que la bobine d'induction ne donne pas beaucoup plus d'électricité qu'une machine de Holtz double; mais, si l'on voulait obtenir

des différences de potentiel notablement plus grandes, la machine de Holtz ne tarderait pas à devenir de beaucoup supérieure à la bobine.

877. Il resterait encore à évaluer la différence de potentiel maximum des différentes machines. On peut employer pour cela, soit la cascade à décharges, dont nous avons décrit l'usage au n° 479, soit l'électroscope à décharges de M. Gaugain. Dans ce dernier cas, on mettra l'électroscope en relation par un fil de coton avec une boule A, laquelle communique avec le conducteur d'une machine par une tige passant à travers une ouverture d'un écran conducteur non isolé, afin d'éliminer l'action directe de la machine sur le fil de coton; le nombre des décharges de la feuille est proportionnel au potentiel de la sphère A. Mais, avec cette disposition et avec la plupart de celles auxquelles on peut avoir recours, les fuites d'électricité qui s'échappent en différents points ne permettent presque jamais au conducteur d'une machine d'atteindre son potentiel maximum, et l'on obtient toujours des nombres trop faibles. D'autre part, la longueur des étincelles que l'on peut tirer d'une machine, même entre des conducteurs de forme déterminée, ne suffit pas non plus à définir le potentiel maximum, parce que cette longueur d'étincelle dépend beaucoup du débit de la machine et de la manière dont les conducteurs sont isolés; on a vu (839) quelles précautions Van Marum avait prises à ce sujet. La distance des peignes aux coussins dans les machines à frottement, ou la distance des deux conducteurs dans les machines doubles, suffit donc pour indiquer une limite supérieure de la différence de potentiel que comportent ces appareils; mais on peut ajouter que cette limite est rarement atteinte.

878. **Débit absolu d'une machine.** — Pour connaître en nombres absolus le débit d'électricité fourni par une machine, il suffit de déterminer le potentiel qu'elle peut établir sur un conducteur dont la capacité électrique est connue. La méthode ne présente aucune difficulté; j'en donnerai un exemple.

J'ai reconnu d'abord, par de nombreuses expériences avec la machine de Holtz à deux plateaux tournants employée précédemment, que, lorsque cette machine était en bon état, il suffisait de 7 tours des plateaux pour électriser une batterie formée de

5 grandes jarres, au point d'obtenir une étincelle d'un millimètre entre deux boules. Ces boules étaient les mêmes que celles qui avaient servi précédemment pour des mesures absolues (481); la différence de potentiel avait donc pour valeur 18,5.

Pour connaître la capacité de la batterie, j'ai pris comme termes de comparaison des condensateurs cylindriques formés par des tuyaux de métal concentriques, ou des condensateurs sphériques. L'un de ces derniers, en particulier, était formé d'une sphère de $0^m,54$ de diamètre, placée entre deux calottes hémisphériques de $0^m,60$ de diamètre intérieur. La capacité de ce condensateur était donc $0^m,27 \times \frac{30}{3} = 2^m,70$, c'est-à-dire équivalente à celle d'une sphère de $2^m,70$ de rayon, isolée et soustraite à toute influence. Il est difficile d'opérer avec des appareils de dimensions plus grandes, et l'on ne peut guère diminuer l'épaisseur de la couche d'air, parce que les étincelles s'échapperaient trop facilement d'une armature à l'autre. Cependant cette bouteille ne pouvait pas être employée directement à évaluer le débit de la machine : elle valait à peine le dixième d'une des jarres de la batterie, de sorte que la comparaison de leurs capacités devait être effectuée avec des corps intermédiaires. On compara d'abord la bouteille à air successivement avec plusieurs jarres de dimensions plus petites, comme celles d'une batterie ordinaire en cascade, dont les capacités étaient de même ordre, en se servant de la petite machine de Holtz à rotations inverses dont le débit est extrêmement régulier; on évaluait, alternativement avec la bouteille type et la jarre à comparer, le nombre de tours nécessaire pour provoquer une étincelle entre les branches d'un excitateur à une distance donnée, lorsque les deux pôles de la machine communiquaient avec les deux systèmes d'armatures; ce nombre de tours est en raison inverse de la capacité de la batterie considérée, de sorte que l'on peut ainsi déterminer en valeur absolue la capacité de la jarre. Il est bien entendu que cette capacité est évaluée sans tenir compte de la première décharge; elle correspond donc à la quantité d'électricité qui s'écoule pendant la décharge brusque. On réunit ensuite les armatures de ces différentes jarres, de manière à constituer une capacité voisine de celle d'une des jarres de la grande batterie, avec lesquelles on

fait successivement la même comparaison. Finalement, on connaît la capacité de la batterie entière. Cette capacité ainsi déterminée s'est trouvée égale à 225 mètres; chaque jarre valait donc en moyenne une sphère de 22,5 mètres de rayon.

En résumé, 7 tours d'une machine de Holtz à 2 plateaux suffisent pour établir une différence de potentiel égal à 18,5 sur un conducteur dont la capacité est de 225 mètres ou 225 000 millimètres. La quantité d'électricité est donc

$$M = 225\,000 \times 18{,}5 = 4\,200\,000.$$

La quantité d'électricité produite par un seul tour de plateau, étant 7 fois plus faible, est représentée par le nombre 600 000.

Ce résultat permet d'évaluer le travail maximum absorbé par la production d'électricité. La machine peut donner des étincelles de 22 centimètres qui correspondent, comme on l'a vu (479), à une différence de potentiel environ 12 fois plus grande que pour une distance explosive d'un millimètre, c'est-à-dire à $18{,}5 \times 12 = 222$. Si l'on admet que le débit de l'appareil n'est pas alors diminué, ce qui est inexact, l'énergie électrique développée par un tour de plateau sera

$$\frac{1}{2} MV = \frac{600\,000}{2} \times 222 = 67\,000\,000.$$

Comme les unités employées jusqu'à présent sont le millimètre et le milligramme, cette énergie correspond en kilogrammètres à 0,067.

Si la machine faisait 15 tours à la seconde, ce qui serait une marche très-rapide, le travail dépensé par seconde dépasserait 1 kgm., c'est-à-dire $\frac{1}{75}$ de cheval-vapeur. Comme le débit est en réalité plus faible, il résulte de là qu'un moteur d'un cheval-vapeur pourrait imprimer une vitesse de 15 tours à la seconde à plus de 75 machines de Holtz doubles, s'il n'y avait pas d'autres résistances à vaincre que les forces électriques.

879. L'énergie électrique d'une batterie est proportionnelle à la longueur d'un fil métallique de diamètre donné que peut fondre la décharge. En effet, Van Marum a vérifié (1) que le

(1) *Première continuation des expériences*, etc., p. 8.

nombre de tours d'une machine nécessaire pour amener à la même tension deux batteries, composées de bouteilles identiques, est proportionnel au nombre des bouteilles et à la longueur d'un fil de fer de diamètre donné que peut fondre la décharge.

De même, si la batterie reste constante, la longueur maximum du fil fondu par la décharge est proportionnelle au carré de la quantité d'électricité. J'ai obtenu, par exemple, les résultats suivants avec un fil de cuivre :

NOMBRE DE TOURS DE MACHINE	LONGUEUR DE FIL FONDU	LONGUEUR CALCULÉE POUR 10 TOURS DE PLATEAU
90	550mm	6,9
80	420	6,6
60	240	6,6
55	200	6,6
50	170	6,8
40	110	6,9

Des expériences de cette nature permettraient de déterminer en valeurs absolues l'énergie électrique d'une batterie, si l'on connaissait exactement la quantité de chaleur nécessaire pour fondre le métal employé. J'ai fait plusieurs séries d'expériences semblables avec la machine de Holtz double, fonctionnant dans les mêmes conditions que précédemment et employée à charger la même batterie de 5 jarres, et déduit de chaque observation le poids du fil qui eut été fondu avec 10 tours de plateau :

NATURE DU MÉTAL	POIDS D'UN MÈTRE DE LONGUEUR	POIDS DU FIL FONDU POUR 10 TOURS	CHALEUR DE FUSION	CHALEUR PRODUITE PAR LA DÉCHARGE
	mg.	mg.		
Cuivre. . .	47,6	0,41	165	67
Fer I. . . .	158	0,33	250	82
Fer II. . . .	52,9	0,36	»	90
Aluminium. .	25	0,21	?	»
Argent. . .	89	0,57	77	44
Platine. . .	35,5	0,89	95	85

Malheureusement, les chaleurs de fusion sont des nombres très-mal connus. La valeur relative à l'argent est empruntée au mémoire de Person (1). La chaleur de fusion du platine a été déterminée par MM. Deville et Debray. M. Grüner a communiqué à la Société d'Encouragement (2) un travail sur la quantité de chaleur que possèdent les produits métallurgiques, où il évalue à 250 la chaleur de fusion pour les fontes de fer grises siliceuses renfermant 3 pour 100 de carbone, et à 165 au plus celle du cuivre rouge. On a pu ainsi calculer, d'une manière nécessairement approximative, les nombres de la dernière colonne qui sont exprimés en millionièmes de calorie.

Les résultats déduits de la fusion du fer et du platine sont assez concordants; les autres, celui de l'argent en particulier, paraissent beaucoup trop faibles.

880. Pour vérifier si les deux modes d'expérimentation conduisent à des nombres au moins de même ordre de grandeur, nous remarquerons que 7 tours de plateau établissent sur la batterie un potentiel égal à 18,5; 10 tours de plateau produiront donc un potentiel égal à 26,4.

L'énergie de la batterie, étant égale à la moitié du produit de la capacité électrique par le carré du potentiel, a pour valeur

$$\frac{225\,000}{2} \times (26,4)^2 = 112\,000 \times 697 = 78\,000\,000 = 0^{kgm},078.$$

En prenant pour équivalent mécanique de la chaleur le nombre 436 donné par M. Regnault, on voit que cette énergie correspond à une quantité de chaleur

$$\frac{0,078}{436} = 0^{cal},000\,179,$$

c'est-à-dire le double du nombre obtenu par la fusion du platine ou du fer. Toutefois, le résidu de la batterie ($\frac{1}{6}$) n'a pas été éliminé dans les expériences de fusion, de sorte qu'en dépensant toute l'électricité, on aurait dû dégager par le fer et le platine, pour 10 tours de plateau, une quantité de chaleur égale à

$$85 \times \left(\frac{6}{5}\right)^2 = 123.$$

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXIV, p. 265.
(2) Séance du 12 novembre 1875.

On serait tenté d'attribuer le désaccord de ces résultats à l'incertitude qui existe sur les valeurs des capacités électriques ou des potentiels, mais il y a d'autres causes d'erreur plus graves. On a supposé que toute la chaleur de la décharge était employée uniquement à fondre le fil, mais l'expérience indique que le phénomène est loin d'être aussi simple. Quand un fil de fer est traversé par une décharge insuffisante pour produire la fusion complète, on remarque souvent qu'il est fondu superficiellement; de même, si l'on fait passer une décharge convenable par un fil de cuivre argenté, l'argent est entièrement volatilisé, le cuivre restant intact (M. Melsens). Ces expériences et d'autres analogues semblent démontrer que la décharge électrique s'effectue surtout par la surface des conducteurs; on conçoit alors qu'une grande partie de la chaleur correspondante se dissipe dans l'air, et que la fusion ne s'opère qu'avec un excès notable de la chaleur strictement nécessaire. Si ce raisonnement est exact, la fusion doit être relativement plus facile pour des fils fins que pour des fils plus gros, parce que le rapport de la surface au poids est alors plus grand. Voici quelques expériences de Van Marum sur des fils de fer, qui semblent confirmer cette conséquence; la batterie, de 45 pieds de surface, était toujours chargée de la même manière.

N° DU FIL	DIAMÈTRE	LONGUEUR DU FIL FONDU	SECTION DU FIL	POIDS DU FIL FONDU
			mm. q.	
Fil n° 16	$\frac{1}{240}$ pouce	84 pouces	0,0112	185 mg.
» n° 12	$\frac{1}{175}$	48	0,0210	199
» n° 10	$\frac{1}{140}$	24	0,0329	155
» n° 8	$\frac{1}{110}$	10	0,0533	104
» n° 6	$\frac{1}{90}$	5	0,0795	79
» n° 5	$\frac{1}{75}$	$\frac{1}{2}$	0,115	13

Le poids de fil fondu diminue rapidement à mesure que le

diamètre augmente, même quand la résistance du fil est assez grande pour que l'on soit certain qu'il absorbe la plus grande partie de la chaleur. L'influence de la surface paraît donc bien démontrée. Il est vrai que les fils aplatis en rubans résistent mieux que lorsqu'ils ont une section circulaire (M. Melsens), mais les résultats ne sont plus alors directement comparables, parce qu'il faudrait tenir compte de la distribution de l'électricité. Enfin Van Marum a reconnu aussi que le résidu d'une batterie est sensiblement plus grand quand le fil par lequel on fait passer la décharge a été complétement fondu.

Il résulte de là que le poids de métal fondu ne correspond pas à l'énergie électrique de la décharge; il n'en indique qu'une valeur minimum et l'on peut admettre, comme résultat approximatif, que les deux tiers au plus de la chaleur disponible sont employés à la fusion. Cette fraction doit dépendre surtout du rapport qui existe entre le contour et la section du fil, c'est-à-dire simplement du diamètre, de sorte que, pour deux fils différents de sections égales, le rapport des poids fondus par une même décharge doit être égal au rapport des chaleurs de fusion. Van Marum a trouvé ainsi que des fils de plomb et d'étain passés à la même filière sont fondus sur des longueurs égales. Or, le produit de la densité du plomb 11,35 par sa chaleur de fusion 15,86 (Person) est égal à 179; le produit de la densité de l'étain 7,29 par la chaleur de fusion 27,41 donne 200, nombre qui diffère peu du premier.

Cependant il y a encore d'autres causes qui influent sur ce phénomène. Ainsi, d'après la densité du fer (7,78) et du cuivre (8,78), et les chaleurs de fusion de ces métaux déterminées par M. Grüner, on trouve que les quantités de chaleur nécessaires pour fondre des longueurs égales de fil de cuivre et de fer de même diamètre sont entre elles comme 145 est à 195; d'où il résulterait que le cuivre doit être plus facile à fondre. Or l'expérience indique précisément le contraire. On a reconnu depuis bien longtemps qu'à diamètre égal, le fer est fondu sur une plus grande longueur que le cuivre par la même décharge électrique; mais M. Melsens a trouvé que ce résultat n'est pas général, et que, pour des fils très-fins, c'est au contraire le cuivre qui fond le plus facilement. On voit donc que la fusion des métaux peut

être employée utilement pour comparer des décharges électriques, mais qu'il est impossible, au moins quant à présent, d'en déduire des nombres absolus.

881. Les renseignements qui nous ont été transmis sur les machines électriques célèbres, par les expérimentateurs qui les ont employées, ne suffisent pas généralement pour qu'on puisse en déduire une comparaison exacte avec les instruments que l'on possède aujourd'hui. Van Marum est le seul qui ait donné des détails très-circonstanciés. Avec 100 tours de plateau de sa machine, il pouvait électriser une batterie de 135 bouteilles, d'un pied carré de surface chacune, au point d'obtenir une décharge spontanée entre les armatures. Ce renseignement n'apprend rien sur le débit de la machine ; mais Van Marum indique que cette même batterie chargée à refus pouvait fondre 25 pieds d'un fil de fer de $\frac{1}{140}$ de pouce de diamètre, ce qui fait 661 milligrammes de fer, lesquels exigent $661 \times 250 = 165\,000$ millionièmes de calorie ou $0^{cal},165$; cette quantité de chaleur équivaut enfin à $0,165 \times 436 = 72$ kilogrammètres. L'énergie d'une telle batterie est donc, avec nos unités, représentée par 72×10^9.

M. Van der Willigen a eu l'obligeance de mettre à ma disposition deux bouteilles ayant fait partie de la batterie de Van Marum. En employant la méthode indiquée plus haut (878), j'ai trouvé que la capacité d'un pied carré de ces bouteilles est d'environ $13^m,50$. La capacité de la batterie entière était donc

$$C = 135 \times 13,50 = 1820^m = 1\,820\,000^{mm}.$$

L'énergie électrique W étant exprimée par la formule

$$W = \frac{1}{2} MV = \frac{1}{2} \frac{M^2}{C},$$

on en déduit pour la quantité d'électricité

$$M = \sqrt{2CW} = \sqrt{2 \times 1820 \times 10^3 \times 72 \times 10^9} = 512 \times 10^6.$$

Enfin, si la charge de la batterie a exigé 100 tours de plateau, il reste pour le débit d'électricité relatif à chaque tour

$$\frac{M}{100} = 5.12 \times 10^6 = 5\,120\,000,$$

c'est-à-dire plus de 8 fois la quantité d'électricité que fournit la machine de Holtz double (878) à chaque rotation, ou 4 fois le débit de notre machine de Ramsden de $1^{m},62$. Mais la machine de Van Marum ne faisait que 40 tours à la minute, de sorte qu'elle débitait en réalité, pendant l'unité de temps, 2 fois moins d'électricité que nos machines de Holtz doubles.

Toutefois, il y aurait encore à faire plusieurs corrections à ce calcul. Si l'on admet que les deux tiers seulement de l'énergie a été employée à fondre le fer, il nous faudra multiplier la masse calculée par $\sqrt{\frac{3}{2}} = 1{,}23$; il faudrait aussi tenir compte du résidu de la batterie, mais j'ai reconnu que le résidu des bouteilles de Van Marum est tout à fait négligeable. En définitive, chacun des plateaux de la machine de Van Marum fournissait une quantité d'électricité plus que double de celle que nous avons obtenue avec un plateau de mêmes dimensions.

La machine hydro-électrique construite par M. Armstrong pour l'Institution polytechnique de Londres, est aussi très-remarquable. Cette machine produisait par minute 140 décharges (1) d'une grande bouteille de Leyde, que la machine à plateau du même établissement chargeait seulement seulement 50 fois pendant le même temps. En admettant que cette machine à frottement valût deux fois celle de Ramsden qui nous a servi d'unité, on voit que le débit de l'appareil d'Armstrong était encore notablement plus faible que celui d'une machine de Holtz double.

Plusieurs physiciens, entre autres Faraday (2), M. Kohlrausch (3) et M. Rossetti, ont comparé le débit des machines électriques à frottement aux courants continus fournis par les piles électriques, soit à l'aide de la décomposition de l'eau, soit par l'action du courant sur l'aiguille d'un galvanomètre; mais ces expériences, surtout pour ce qui a trait aux mesures absolues, s'appuient sur des considérations étrangères à l'électricité statique, et il ne serait pas opportun de les examiner ici.

(1) *Phil. Mag.*, t. XXIII, p. 104. — Une erreur a été commise dans la traduction de ce mémoire pour les *Annales de chimie et de physique*, 3e série t. X, p. 106.

(2) *Exp. Researches*, t. I, p. 84 et 253.

(3) *Pogg. Ann.*, t. CXXXV, p. 120. — *Annales de Chimie et de Physique* 4e série, t. XVI, p. 484.

CHAPITRE XIV

DES SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

ÉLECTRICITÉ DE CONTACT.

882. **Expériences de Galvani.** — Jusqu'à la fin du siècle dernier on ne connut guère d'autre moyen de produire de l'électricité (si l'on excepte l'électricité atmosphérique, dont l'origine est encore bien obscure aujourd'hui) que les actions mécaniques, telles que le frottement de deux corps différents, la pression, le clivage, ou les changements de température, comme on l'avait observé pour la tourmaline. Plusieurs physiciens avaient bien essayé de constater un dégagement d'électricité dans les actions chimiques, la formation des vapeurs ou même la végétation des plantes; mais le résultat de ces tentatives était resté fort douteux. Les observations de Galvani, professeur d'anatomie à l'Université de Bologne, sur l'électricité animale ont été le point de départ d'une phase nouvelle dans la science.

En 1780 Galvani, ayant disséqué une grenouille pour des expériences de physiologie, la plaça sur une table auprès d'une machine électrique ; un aide vint à toucher par hasard les nerfs crureaux avec la pointe d'un scalpel, aussitôt tous les muscles des membres inférieurs se contractèrent comme s'ils étaient pris de convulsions violentes. On reconnut bientôt que le contact du scalpel n'était pas la cause unique du phénomène, car les contractions se manifestaient seulement toutes les fois qu'on tirait une étincelle de la machine électrique.

Cette première découverte n'était en réalité que l'expérience

du choc en retour manifesté par la contraction d'organes vivants ; Galvani reconnut, en effet, que les mêmes contractions se produisent toutes les fois que les nerfs, situés dans le voisinage d'une machine ou d'un corps électrisé d'une manière quelconque dont on tire des étincelles, sont mis en relation avec le sol par l'intermédiaire d'un corps conducteur, et qu'elles disparaissent si l'on emploie un corps isolant.

Voulant employer cet électroscope d'un genre nouveau à l'étude de l'électricité atmosphérique pendant les orages, Galvani fit élever au-dessus de sa maison une tige de fer pointue communiquant avec un fil métallique qui pénétrait dans son laboratoire. A la partie inférieure de ce fil, terminée en crochet, on attacha les nerfs lombaires d'une grenouille disséquée. Les contractions des muscles se manifestèrent souvent au moment des éclairs, et même quelquefois par un ciel nuageux sans qu'il y eût apparence d'éclairs.

Enfin Galvani, en 1786, chercha à manifester par les mêmes moyens l'électricité qui se trouve dans l'atmosphère par les temps calmes. A cet effet, il prépara une grenouille à la manière ordinaire, et la suspendit à une balustrade en fer par un crochet de cuivre qui traversait la moelle épinière. L'expérience fut absolument négative au point de vue du but que se proposait Galvani ; mais, ayant par hasard amené les cuisses de l'animal jusqu'au contact des barreaux de fer, il vit avec surprise les muscles se contracter violemment, et les mouvements convulsifs se reproduire chaque fois qu'il établissait le contact entre les muscles et les barreaux. Pour s'assurer que ce phénomène n'était pas dû aux altérations que le fer avait subies, ou à un état électrique particulier qu'il aurait acquis par une longue exposition à l'air, Galvani répéta l'expérience sous toutes les formes. Il suspendit la grenouille à un crochet en fer bien poli, puis il établit une communication entre les muscles et le fer par un fil de cuivre ; ou bien il réunit les nerfs et les muscles de la jambe par un fil formé de deux métaux différents, comme le cuivre et le zinc (fig. 245), et reconnut que les mêmes contractions se manifestent toutes les fois que le contact est établi (1).

(1) *Aloysii Galvani de viribus electricitatis in motu musculari commentarius.* Bononiæ, 1791.

Cette découverte parut à Galvani la confirmation inespérée de ses idées préconçues sur les analogies qui existent entre l'agent nerveux et l'électricité. Il considéra le corps des animaux comme une véritable bouteille de Leyde qui se charge spontanément par un phénomène corrélatif de la vie, et dont les armatures sont formées par les muscles et les nerfs ; le condensateur ainsi constitué se décharge quand on établit une communication conductrice entre les deux armatures, et provoque une contraction musculaire, comme le ferait une étincelle électrique d'origine étrangère. Cependant Galvani ne manqua pas de remarquer que les secousses sont beaucoup plus violentes lorsque la communication des nerfs avec les muscles est établie par l'intermédiaire de deux métaux, mais cette circonstance ne lui parut pas démontrer suffisamment que l'origine de l'électricité devait être cherchée dans les métaux eux-mêmes.

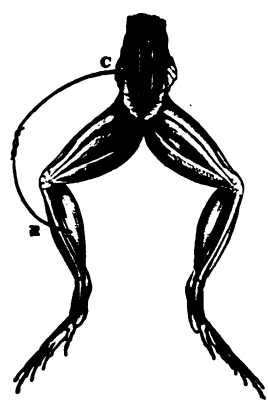


Fig. 245.

Les expériences de Galvani eurent immédiatement un grand retentissement, et ses idées furent en général accueillies avec faveur. Toutefois Volta, insistant sur la nécessité de deux métaux différents pour provoquer les contractions, émit l'opinion que l'électricité n'est pas n écessai rement d'origine animale, qu'elle se produit au contact même des deux métaux, et que l'ensemble des muscles et des nerfs de la grenouille intervient simplement comme un électroscope.

Il en résulta entre les deux savants une discussion mémorable, dans laquelle chacun d'eux accumula les preuves les plus ingénieuses en faveur de sa théorie. Ainsi Galvani démontra que la présence des deux métaux n'est pas nécessaire. Il obtint des contractions en réunissant les nerfs et les muscles par un fil d'or, ou en laissant tomber sur un bain de mercure une grenouille fraîchement préparée. Il montra même qu'on peut supprimer toute substance métallique, et qu'il se manifeste encore des contractions quand on réunit les nerfs et les muscles par une bande de papier mouillée ou par un morceau d'un muscle

étranger, ou encore quand on replie la jambe de manière à lui faire toucher le nerf. Au lieu d'ébranler les idées de Volta, ces nouvelles expériences lui servirent à généraliser davantage sa théorie. Il admit qu'il se produit de l'électricité, non seulement au contact de deux métaux, mais aussi au contact de deux substances quelconques de nature différente, quoique l'effet soit toujours plus manifeste avec les métaux.

Il est curieux de constater que les nombreux travaux exécutés depuis cette époque ont fini par donner raison aux deux adversaires. Il est vrai, d'après l'opinion de Volta, que le contact de deux métaux peut être considéré comme une source d'électricité; mais les organes des animaux sont dans le même cas, et une partie au moins des expériences de Galvani doit être expliquée par l'électricité propre de la grenouille, comme Volta [1] le reconnaissait d'ailleurs lui-même.

A la même époque, Fabroni [2] attribua la production d'électricité aux actions chimiques qui s'exercent, soit entre les métaux et l'air atmosphérique, soit entre les métaux et les liquides de l'organisme, actions chimiques que le contact des métaux entre eux a pour effet d'exalter. Cette explication des effets de la pile de Volta par les phénomènes chimiques, un peu négligée d'abord, a fini par acquérir un grand crédit; elle a été pour ainsi dire seule adoptée pendant assez longtemps, et nous verrons bientôt comment on doit l'interpréter.

883. **Expériences de Volta.** — Volta a cherché à mettre hors de doute les deux propositions suivantes [3] :

1° Ce que l'on appelle le fluide galvanique n'est autre chose que de l'électricité.

2° Le contact de deux corps produit entre eux une *force électrique*, une *impulsion électrique*, ou une *tension*.

Ces trois expressions, qui reviennent souvent comme équivalentes dans le langage de Volta, expriment une idée qui était parfaitement claire dans son esprit. La *tension* de contact ne résultait pas pour lui d'une quantité déterminée d'électricité, ou d'un excès d'électricité sur l'un des corps, comme on l'a dit sou-

[1] *Lettre à* T. Cavallo. *Phil. trans.* (1793), part. I, p 10.
[2] *Journal de Physique de l'abbé Rozier*, t. XLIX, p. 348 (1799).
[3] *Annales de Chimie*, 1re série, t. XL, p. 225 (1801).

ent; elle représentait une force, une tendance des deux électri-
ités à marcher l'une vers l'autre, tendance à laquelle la diffé-
ence de nature des deux corps faisait obstacle. Pour traduire
idée de Volta dans le langage actuel, il suffit d'admettre que le
ontact de deux corps établit entre eux une certaine différence
e potentiel. Chacun des deux métaux est à un potentiel constant
ans toute son étendue; mais, au passage d'un métal à l'autre
travers la surface de contact, il se manifeste un changement
apide de niveau électrique. Ce changement, sans être ab-
olument brusque, ce qui serait contraire au principe général
e continuité dans les phénomènes physiques, s'effectue dans
ne étendue inappréciable, et la variation du potentiel est indé-
endante de la valeur absolue du potentiel sur chacun des mé-
aux. C'est là l'hypothèse fondamentale dont tous les phénomènes
euvent se déduire; si nous employons quelquefois le mot de
ension électrique pour abréger le langage, il faudra l'entendre
ans le sens d'une différence de potentiel.

Voici maintenant quelques-unes des expériences de Volta :

1° Volta prit une double lame métallique formée d'un disque
le zinc soudé à un disque d'argent; tenant le zinc avec la main,
l appliqua le disque d'argent sur le plateau inférieur A d'un
électroscope condensateur, et mit par l'autre main le plateau
supérieur B en communication avec le sol. Supprimant ensuite
les contacts, puis enlevant le plateau supérieur, il vit les pailles
diverger de 2°, 3° et même 4°; elles étaient chargées d'électri-
cité *négative*.

2° Prenant ensuite l'argent avec la main et appuyant le zinc
sur le plateau inférieur par l'intermédiaire d'un morceau de
drap ou de carton humide, il obtint de même 3° ou 4° d'électri-
cité *positive*.

L'interposition du drap dans cette expérience a pour but de
supprimer le contact direct du zinc avec le cuivre du plateau.
Comme les propriétés électriques du cuivre et de l'argent sont à
peu près identiques, ce nouveau contact établirait entre le pla-
teau et le zinc une différence de potentiel égale et de sens con-
traire à celle qui existe entre le zinc et l'argent, de sorte que
les deux plateaux du condensateur seraient au même potentiel,
et la charge nulle.

Volta admet, il est vrai, que le contact du zinc avec les doigts, dans le premier cas, et avec le drap mouillé dans le second, n'ont eu aucune influence, tandis que c'est là précisément que les partisans de la théorie chimique font résider la production d'électricité. Pour répondre à cette objection, Volta répète la première expérience en plaçant entre la main et le zinc une rondelle mouillée, et vérifie qu'alors les résultats ne sont pas modifiés. Il ajoute, toutefois, qu'il se produit une action énergique si le drap est mouillé par des acides ou alcalis concentrés, de sorte qu'en définitive ces deux expériences sont peu démonstratives ; la suivante n'est pas sujette aux mêmes objections.

3° Les deux disques de zinc et d'argent peuvent rester isolés dans la première expérience, pourvu que leurs surfaces soient très-grandes, ou que la lame de zinc soit en communication avec un conducteur d'une très-grande surface, une bouteille de Leyde par exemple. En opérant ainsi, Volta a obtenu sur le plateau inférieur, non plus 3° ou 4° comme précédemment, mais seulement 1° ou 2° d'électricité négative.

Cette expérience de Volta est intéressante, mais un peu complexe ; la production d'électricité tient, non pas au contact du zinc avec l'argent, comme le croyait Volta, mais à la différence des armatures de la bouteille de Leyde. Elle ne réussirait probablement pas si les deux armatures étaient formées du même métal ; mais, à cette époque, les bouteilles étaient couvertes d'étain à l'extérieur et remplies à l'intérieur de feuilles de clinquant. Nous supposerons donc que l'armature intérieure est en cuivre, comme les plateaux, et qu'elle communique avec le plateau supérieur de l'électroscope ; le plateau inférieur est relié à l'armature extérieure par la double lame d'argent et de zinc. Soit x le potentiel intérieur de la bouteille, y son potentiel extérieur, C sa capacité électrique ; c la capacité de l'électroscope, V_a et V_b les potentiels des deux plateaux. Comme il n'y a aucune source d'électricité autre que les contacts, les deux condensateurs se chargeront de quantités d'électricité égales, mais de signes contraires aux deux extrémités d'un même conducteur. Soit m cette charge commune, et supposons qu'elle soit négative, par exemple, sur le plateau A. Nous verrons plus loin (885) que, d'après une loi de Volta, lorsque deux métaux sont réunis d'une manière

quelconque par des conducteurs métalliques, la différence de leurs potentiels est la même que si ces métaux étaient directement en contact ; il en résulte déjà

$$x = V_b,$$

et

$$m = (y - V_b)\,C = (V_b - V_a)\,c.$$

Représentons maintenant par le symbole $Sn|Cu$ la différence de potentiel caractéristique du contact de l'étain avec le cuivre, on aura encore

$$y - V_a = Sn|Cu.$$

On déduit de ces équations

$$m\left(\frac{1}{C} + \frac{1}{c}\right) = Sn|Cu,$$

$$m = \frac{c}{1 + \frac{c}{C}}\,Sn|Cu.$$

Si l'on supprime la bouteille de Leyde, la charge de l'électroscope est nulle; si le rapport $\frac{c}{C}$ est très-petit, la charge est celle que donnerait le contact direct Étain|Cuivre ; comme la différence des potentiels de ce contact est, d'après Volta, à peu près moitié moindre que pour le contact Zinc|Cuivre, on voit que le résultat de l'observation est d'accord avec ce qu'indiquerait le calcul. La production d'électricité est difficile à expliquer ici autrement que par le simple contact, mais le phénomène est peut-être trop complexe pour entraîner la conviction ; la dernière expérience de Volta ne prête plus à aucune équivoque.

4° On applique l'un contre l'autre, à l'aide de manches isolants, deux plateaux, l'un de zinc et l'autre de cuivre, parfaitement polis et dont les surfaces sont bien planes ; on les sépare ensuite normalement et on les approche séparément d'un électroscope très-sensible. On reconnaît que les deux plateaux sont électrisés, le cuivre négativement, le zinc positivement, et ont des charges égales : Volta obtenait ainsi une divergence des pailles de 3°. L'expérience réussit très-bien avec des plateaux de

10 centimètres de diamètre et un électroscope à pile sèche. Volta fait observer que, dans cette circonstance, il y a contact à la manière ordinaire et en même temps un phénomène de condensation ; en effet, lorsque l'équilibre a lieu, la charge électrique est égale au produit de la différence de potentiel $Zn|Cu$, caractéristique du contact des deux métaux, par la capacité de l'espèce de condensateur que forment les plateaux.

884. **Loi du contact.** — Nous adopterons donc l'électricité de contact, définie par la différence de potentiel ou la tension des deux corps qui se touchent, sauf plus tard à discuter les objections qui ont été faites à cette théorie ; nous admettrons aussi provisoirement que, dans la première expérience de Volta, le contact des doigts et du drap humide avec les métaux ne joue qu'un rôle négligeable.

Volta a voulu vérifier que la grandeur des lames et l'étendue de la surface de contact n'ont pas non plus d'importance, de sorte que la différence de potentiel est la seule quantité définie. Il reconnut d'abord qu'avec un condensateur donné, la déviation des pailles est complétement indépendante de la grandeur des lames et de l'étendue du contact. En second lieu, il s'est servi de condensateurs ayant des forces accumulatrices (forces condensantes) qui étaient de 120, 180, 240 et 300, et il a obtenu des déviations de 2°, 3°, 4° et 5°, c'est-à-dire proportionnelles aux forces condensantes, ce qui doit être.

Les principes étant bien établis, Volta a déterminé la liste des tensions des métaux, en les rangeant d'après la tendance plus ou moins grande qu'ils ont à prendre l'une ou l'autre des deux électricités. L'existence d'une semblable échelle des corps, de même que pour l'électricité de frottement, n'est pas évidente à priori ; mais, si un métal M prend de l'électricité positive par son contact avec un autre métal A, et de l'électricité négative avec un métal B, l'expérience montre toujours que, lors du contact des métaux A et B entre eux, le premier prend de l'électricité négative et le second de l'électricité positive.

Dans le cas d'un contact entre deux corps, on a l'habitude d'appeler électro-négatif celui des deux qui se charge d'électricité positive, afin de rappeler par là que ce corps exerce sur l'électricité positive une sorte d'attraction, comme s'il était électrisé

négativement. Plus exactement, on appelle électro-négatif celui des deux corps qui, dans le contact, prend le potentiel le plus élevé ; l'autre corps est électro-positif. Pour éviter l'ambiguité que ces expressions ont l'inconvénient de créer, nous dirons qu'un corps est *positif* ou *négatif*, suivant que dans son contact avec un autre il prendra le potentiel le plus *élevé* ou le plus *faible*. A ce point de vue, les corps forment, à une température déterminée, une série continue que l'on appelle la série des *tensions*, et qui présente beaucoup d'analogie avec l'échelle des températures. D'après Volta, les métaux usuels se classent dans l'ordre suivant, en commençant par les plus négatifs :

Argent,	Fer,	Plomb,
Cuivre,	Étain,	Zinc.

Au-dessus de l'argent, on pourrait mettre aussi des corps d'une autre nature, tels que la plombagine et le bioxyde de manganèse.

885. **Loi des tensions.** — Lorsque plusieurs métaux sont soudés les uns aux autres, de façon à former une chaîne continue, *la différence des potentiels des métaux extrêmes est la même que s'ils étaient directement en contact*. Cette loi importante a été établie expérimentalement par Volta. En prenant pour unité la différence des potentiels du contact Cuivre|Argent, il a trouvé pour les autres contacts successifs les valeurs :

$$Cu|Ag = 1,$$
$$Fe|Cu = 2,$$
$$Sn|Fe = 3,$$
$$Pb|Sn = 1,$$
$$Zn|Pb = 5;$$

et l'expérience a montré que la tension de contact du zinc avec l'argent est représentée par 12. Or, si l'on imagine une chaîne formée des métaux suivants : zinc, plomb, étain, fer, cuivre, argent, la différence de potentiel des métaux extrêmes est évidemment égale à la somme des différences relatives à tous les contacts successifs, et cette somme est aussi égale à 12.

Soient A, B, C, D, E des métaux successivement en contact; en désignant par le symbole M|N la différence des potentiels ca-

ractéristique du contact des deux métaux M et N, on peut représenter la loi de Volta par la formule suivante :

$$(1) \qquad A|B+B|C+C|D+D|E=A|E.$$

Chacun des termes du premier membre peut être plus grand ou plus petit que zéro, selon que le premier des deux métaux que l'on rencontrera, en suivant la chaîne dans un sens déterminé, sera positif ou négatif par rapport au suivant.

On a d'ailleurs, d'après les conventions :

$$M|N=-N|M.$$

Si donc on fait passer tous les termes de l'équation (1) dans le premier membre, il vient :

$$A|B+B|C+C|D+D|E-A|E=0,$$

ou bien :

$$(2) \qquad A|B+B|C+C|D+D|E+E|A=0.$$

Cette équation (2) est une conséquence très-importante de la loi de Volta; elle montre que, si les deux métaux qui terminent la chaîne sont identiques, la somme totale des différences de potentiel, quand on va d'une extrémité à l'autre, est nulle, et, par suite, que les niveaux électriques aux deux bouts de la chaîne sont identiques. Si l'on ferme la chaîne en réunissant les extrémités, on n'introduit pas de nouveau contact et la somme des tensions est encore nulle. Il ne pourra se produire aucun phénomène électrique dans l'un quelconque des métaux, puisque les extrémités de chacun d'eux sont au même potentiel, et il ne se produira rien non plus d'un métal à l'autre, la différence des potentiels étant sur toutes les soudures égale à celle qui caractérise le contact; il ne peut donc exister aucun courant électrique permanent dans un pareil circuit. Cette proposition n'est pas autre chose que l'*impossibilité du mouvement perpétuel*. Si la loi de Volta n'était pas vraie, une série de contacts entre métaux dans un circuit fermé pourrait produire un courant électrique permanent; comme ces courants développent de la chaleur, il en résulterait un travail qui ne correspondrait à aucune dépense équivalente.

886. Volta a partagé les corps en deux grandes classes. La première renferme ceux qui obéissent à la loi des tensions : elle comprend tous les métaux et un certain nombre de corps solides ; la seconde classe renferme les corps pour lesquels la loi des tensions n'est plus vraie : ce sont en général les conducteurs humides. Ainsi le contact Zinc | Argent donne une différence de potentiel égale à 12, et le contact de l'eau avec le zinc une différence égale à 1 seulement. D'après la loi des tensions, le contact Eau | Argent devrait donner une différence de potentiel égale à 13, tandis qu'en réalité cette différence est aussi sensiblement égale à 1.

En formant une chaîne continue avec des corps pris dans les deux classes, il est possible de terminer la chaîne par des métaux identiques qui soient alors à des potentiels différents, et puissent produire des effets électriques continus, de manière à constituer un véritable *électro-moteur* analogue aux machines à frottement. Mais, ce que nous avons dit plus haut à propos du mouvement perpétuel n'est pas applicable ici, parce que le contact des métaux avec les conducteurs humides donne lieu à des actions chimiques, qui accompagnent toujours les phénomènes électriques et en représentent le travail mécanique. Toutefois Volta ne paraît pas avoir aperçu cette distinction capitale, car il ne considère pas comme impossible de trouver des corps, comme les métaux, qui ne suivraient pas la loi des tensions et qui permettraient la construction d'un appareil électromoteur sans liquide ; ce serait alors la réalisation du mouvement perpétuel.

Volta s'est aussi demandé s'il n'y aurait pas parmi les liquides des corps obéissant entre eux à la loi des tensions, ce qui constituerait une troisième classe de conducteurs ; la considération des poissons électriques, dont les appareils peuvent être assimilés, d'après lui, à une pile composée uniquement d'organes humides, lui fait présumer cependant que la loi ne doit pas être applicable à tous les liquides. Nous verrons, en effet, que cette loi des tensions a lieu pour certains liquides entre eux, mais qu'elle n'est pas exacte d'une manière générale.

887. **Principe de la pile de Volta.** — Enfin, en s'appuyant sur les expériences qui précèdent, Volta a imaginé cet appareil merveilleux, la *pile électrique*, dont nous ne donnerons pour le

moment que le principe. Volta superpose alternativement une série de disques formés par des monnaies d'argent et des lames de zinc, mais en ayant soin de supprimer de deux en deux le contact direct du zinc et de l'argent, par l'interposition d'une rondelle humide de carton ou de drap. La différence des potentiels, aux deux extrémités de cette colonne ou *pile* de disques, est d'autant plus grande que les éléments de la colonne sont plus nombreux. Appelons *couple* l'ensemble de deux disques de métal et d'une rondelle humide. Volta a reconnu que, si un couple donne à l'électroscope condensateur une déviation de 2°, deux couples donneront 4°, trois couples 6°, quatre couples 8°, etc. En effet, les contacts de l'eau avec le zinc et avec l'argent étant à peu près identiques, d'après Volta, la différence de potentiel des couples extrêmes sera proportionnelle au nombre des contacts du zinc avec l'argent, qui sont tous de même sens, et la charge de l'électroscope sera aussi proportionnelle au nombre des couples.

Si la pile est isolée, les deux extrémités ou pôles ont des potentiels égaux et de signes contraires; si l'un des pôles communique avec le sol, l'autre pôle prend un potentiel, positif ou négatif, égal en valeur absolue à la différence que détermine le nombre des couples.

Par extension, on appelle *pile électrique* un ensemble de couples, de nature et de forme quelconques, réunis ainsi bout à bout.

888. **Discussion du principe de Volta.** — Avant d'étudier plus complétement la pile électrique, il est nécessaire de revenir sur la théorie du contact, et d'examiner les expériences qui ont été publiées depuis Volta, pour combattre ou pour appuyer le principe nouveau qu'il a introduit dans la science.

En dehors de l'hypothèse du contact, on peut attribuer la production d'électricité, dans les expériences de Volta, soit à des actions mécaniques, telles que le frottement ou la pression des métaux l'un contre l'autre, soit aux actions chimiques exercées par la moiteur de la main ou par l'humidité des rondelles, soit enfin à l'action de la couche d'air environnante.

Péclet (1) a fait à ce sujet un certain nombre d'expériences intéressantes. Il s'est servi d'un électroscope condensateur à feuilles

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. II, p. 233.

d'or, dont les plateaux étaient des disques de verre dorés, recouverts sur les faces en regard d'une couche de vernis que l'on avait usée à l'émeri afin de rendre les surfaces bien parallèles. Cet électroscope avait été gradué à l'aide du multiplicateur à trois plateaux (268), ou bien avec une pile électrique. Les deux modes de graduation indiquèrent que jusqu'à 50° la divergence des feuilles d'or était sensiblement proportionnelle à la quantité d'électricité, ou à la différence de potentiel des plateaux.

Péclet répète la quatrième expérience de Volta de la manière suivante. Deux plateaux, A et B, l'un de cuivre et l'autre de zinc, portés par des manches isolants, sont appliqués l'un sur l'autre, puis séparés normalement, et mis en contact séparément avec les deux plateaux A′ et B′ de l'électroscope condensateur. Après plusieurs opérations semblables, on sépare les plateaux de l'électroscope et on observe la déviation des feuilles.

Après 10 contacts,		l'écartement fut de	10°
— 20	—	—	20°
— 30	—	—	25°
— 40	—	—	30°
⋮			⋮
Un très grand nombre			100°

On voit, d'après ce tableau, que la charge est d'abord proportionnelle au nombre de contacts, comme on pouvait le prévoir. En effet, lorsque les plateaux A et B sont séparés, ils se trouvent à des potentiels très-élevés par rapport à ceux de l'électroscope, auxquels ils cèdent la presque totalité de leurs charges électriques. Le défaut de proportionnalité qui se manifeste plus tard tient surtout à la déperdition.

Les actions mécaniques ne jouent aucun rôle dans le phénomène. En effet, les résultats ne sont pas modifiés quand on appuie plus ou moins l'un contre l'autre les plateaux A et B ; si on les frotte et qu'on les sépare quand ils se touchent par leurs bords, non-seulement la quantité d'électricité n'est pas augmentée, mais elle devient insensible. C'est là une conséquence facile à prévoir, puisque la capacité des plateaux est devenue très-faible par rapport à sa valeur primitive.

Pour le démontrer d'une manière plus complète, on applique l'un sur l'autre les plateaux A et B, sans faire coïncider leurs

centres, de façon que la surface de contact soit diminuée ; on reconnaît alors que la quantité d'électricité varie à peu près comme l'étendue des surfaces en contact, c'est-à-dire comme la capacité électrique de l'appareil.

On peut encore, comme le faisait Pfaff (1), vernir les plateaux A et B sur les faces qui se touchent et les réunir extérieurement par un fil métallique quelconque ; quand on les sépare ensuite, le zinc est positif et le cuivre négatif. C'est même la méthode qui donne le maximum d'effet. L'avantage de cette disposition tient sans doute à ce que la couche de vernis, bien que diminuant par son épaisseur la capacité électrique du condensateur formé par les plateaux, permet de les séparer sans provoquer de contact irrégulier. Si l'on veut se borner à manifester la présence et le signe de l'électricité, il suffit d'approcher ces plateaux d'un électroscope sensible.

Dans l'expérience de Péclet, le plateau de zinc B, par exemple, est alternativement en contact avec deux plateaux de cuivre A et B'. Si l'on veut éviter ces contacts multiples, on formera le plateau inférieur A' de l'électroscope en cuivre, le plateau supérieur B' en zinc, vernis tous deux sur les faces en regard. On appliquera alors les deux plateaux A et B l'un sur l'autre, puis les séparant, on touchera A par A' et B par B' ; on trouvera toujours de l'électricité positive sur le zinc et négative sur le cuivre. On peut d'ailleurs, dans cette expérience, maintenir en communication avec le sol l'un des systèmes de plateaux, A et A' ou B et B', sans modifier sensiblement les résultats.

Enfin, une dernière expérience consiste à employer deux électroscopes condensateurs, dont l'un a ses deux plateaux A et B en cuivre, et l'autre un plateau B' de zinc et le second plateau A' en cuivre, tous vernis sur les faces en regard. On réunit par des fils métalliques isolés, d'une part les plateaux A et A', et d'autre part B et B' ; supprimant ensuite les communications, puis enlevant les plateaux supérieurs, on trouve que le plateau de zinc B' est positif et le plateau de cuivre B négatif.

Dans cette expérience de Volta, qui a été variée de tant de manières, on voit que la production d'électricité ne peut pas être

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XLI, p. 236.

attribuée aux actions mécaniques, et que les phénomènes s'expliquent dans tous leurs détails, si l'on admet l'existence d'une différence de potentiel caractéristique du contact.

889. Toutefois, un certain nombre de physiciens ont refusé d'admettre l'électricité de contact et, généralisant l'idée de Fabroni, cherchent à expliquer tous les phénomènes par des actions chimiques. De la Rive [1] attribuait, par exemple, la production d'électricité dans les premières expériences de Volta à l'action chimique qui s'exerce entre le zinc et les doigts humides ou le drap mouillé, action par laquelle le métal devient négatif et le liquide positif. Pour les autres cas, où l'on ne fait intervenir aucun liquide, l'électricité des deux métaux, zinc et cuivre, proviendrait de l'oxydation du zinc au contact de l'air. Par suite de cette oxydation, le métal oxydé est électrisé négativement, et la couche d'air qui l'environne, positivement. Le zinc communique alors au cuivre par contact une partie de son électricité négative, de sorte que, si l'on sépare les deux métaux, le cuivre est négatif et le zinc paraît positif, à cause de l'excès d'électricité positive que possède la couche de gaz qui lui reste adhérente [2].

Cette explication est en désaccord avec les expériences par lesquelles Pfaff a montré que l'on obtient exactement les mêmes résultats dans le vide et dans les gaz secs, tels que l'air, l'oxygène, l'azote, l'acide carbonique, l'hydrogène, l'hydrogène bicarboné; néanmoins, de la Rive réfutait l'objection en disant qu'il est impossible d'enlever par le vide ou par un courant de gaz la couche d'air condensée à la surface d'un métal, et qu'il doit y avoir dans tous les cas une action chimique sur le zinc.

Rien de pareil ne peut se produire dans l'expérience suivante de Péclet. Deux plateaux de cuivre et de zinc, vernis sur toute leur surface, portent chacun un fil de platine; on applique ces deux plateaux l'un sur l'autre, et l'on fait toucher les fils de platine; on supprime le contact et, séparant les plateaux, on les approche d'un électroscope : le zinc est positif et le cuivre négatif. Il ne se manifeste aucune trace d'électricité, si l'on néglige de faire toucher les fils de platine.

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXXIX, p. 310.
[2] *Traité d'électricité*, t. II, p. 776.

M. Gassiot (¹) a répété la même expérience, sans produire de contact, même indirect. Deux plateaux, l'un A en zinc, l'autre B en cuivre, maintenus à une distance de $\frac{1}{100}$ de pouce, communiquent séparément par des fils d'or avec deux plaques en or, A′ et B′, entre lesquels est suspendue une feuille d'or reliée au pôle positif d'une pile sèche. Les deux plaques A′ et B′ étant au même potentiel, la feuille se maintient en équilibre au milieu de leur distance par raison de symétrie. Quand on écarte les deux plateaux, la feuille d'or se rapproche de la plaque B′ qui communique avec le cuivre. Pour expliquer ce phénomène par la théorie des actions chimiques, il faudrait admettre que l'électricité négative du zinc, due à l'oxydation, a passé à la plaque d'or correspondante, et qu'on l'a enlevée avec la main en montant l'appareil; l'explication est, au contraire, très-simple par l'hypothèse de l'électricité de contact. Soit x le potentiel du zinc, y celui du cuivre, a celui des plaques d'or. On a :

$$x - a = Zn\,|\,Au,$$
$$a - y = Au\,|\,Cu;$$

et, par suite,

$$x - y = Zn\,|\,Au + Au\,|\,Cu = Zn\,|\,Cu;$$

la quantité d'électricité positive m, que possède le plateau de zinc, est, en appelant C la capacité de ce plateau dans les conditions où il est placé,

$$m = C\,(x - y) = C \times Zn\,|\,Cu.$$

Si l'on sépare les plateaux, la charge de chacun d'eux restant la même, leurs potentiels deviennent beaucoup plus élevés, puisque la condensation n'a plus lieu; comme ils sont électrisés en sens contraires, la différence des actions des plaques correspondantes sur la feuille d'or peut être rendue manifeste.

890. **Expériences de M. Thomson.** — Nous rapporterons encore quelques expériences ingénieuses de M. Thomson, qui conduisent aux mêmes conséquences.

Une lampe à alcool en métal est placée sur un support isolé et mise en communication avec un électromètre très-délicat.

(¹) *Phil. Mag.*, 3ᵉ série, t. XXV, p. 363.

Des cylindres de cuivre et de zinc, maintenus en relation avec la cage de l'électromètre et avec le sol, sont placés alternativement dans une position verticale, de façon que la flamme brûle au centre de ces cylindres qui sont ouverts aux deux bouts. Si l'on note l'indication de l'électromètre qui correspond à l'emploi du cylindre de cuivre, on vérifie qu'en substituant le zinc au cuivre, le potentiel de la flamme augmente d'une manière très-sensible. Cette expérience différentielle élimine l'objection que l'on pourrait tirer de la combustion de la flamme et de la complication du conducteur qui la relie à l'électromètre. La déviation de l'aiguille étant de 79 divisions pour un couple Daniell, le changement produit par la substitution du zinc au cuivre a été de 39 divisions. Comme la flamme prend, dans les deux cas, exactement le potentiel du cylindre qui l'entoure, si ce dernier est assez long pour qu'on puisse le considérer comme infini (il suffit que la longueur égale 3 ou 4 fois le diamètre), on peut conclure de cette expérience que la différence des potentiels produite par le contact du zinc et du cuivre est environ la moitié de celle que donne un couple Daniell.

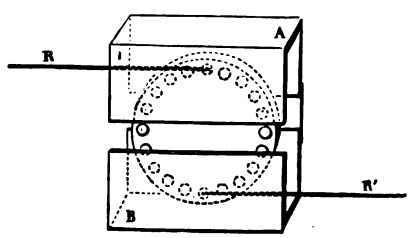


Fig. 246.

Tous les égaliseurs de potentiel peuvent servir à démontrer la même propriété ; tel est, par exemple, l'appareil à chevilles de métal décrit plus haut (860). On entoure les ressorts R et R' (fig. 246) par deux lames de métal recourbées A et B; ces lames servent d'inducteurs, et l'on fait communiquer les ressorts avec les deux électrodes d'un électromètre. Les deux inducteurs communiquant l'un avec l'autre, on garnit la surface intérieure de l'un d'eux par une feuille de zinc, puis, faisant marcher l'appareil, on note la position d'équilibre qu'atteint l'aiguille de l'électromètre. On remplace ensuite le zinc par une feuille de cuivre, et la nouvelle déviation observée montre que le potentiel du cuivre est notablement plus faible. Dans une expérience de M. Thomson, la différence a atteint 0,72 de celle que donne un

couple Daniell. Ce résultat n'est pas tout à fait identique au précédent, mais l'expérience comporte plusieurs causes d'erreur; il suffit, par exemple, que la surface de cuivre soit ternie par l'oxydation, pour que ce métal devienne sensiblement plus négatif. En répétant la même expérience avec du cuivre dont la surface avait été exposée à la flamme d'une lampe jusqu'à prendre une teinte ardoisée, M. Thomson a obtenu une déviation égale à 1,25 fois celle d'un couple Daniell.

891. On peut même, à l'aide des multiplicateurs, augmenter l'électricité de contact au point d'en obtenir des étincelles. Nous avons déjà indiqué (846) la propriété curieuse que possédait une machine de Tœpler de se charger spontanément et toujours dans le même sens, grâce au contact de métaux différents.

M. Thomson emploie encore un appareil à écoulement d'eau formé d'un seul inducteur I (fig. 242) et d'un récepteur R, ce dernier étant en communication avec un électromètre délicat. L'inducteur et le tube à écoulement T sont réunis par un fil de métal. Si ce tube est en cuivre et l'inducteur en zinc, ou recouvert d'une feuille de zinc bien polie sur sa surface intérieure, les gouttes qui tombent s'électrisent négativement, et le récepteur acquiert rapidement une charge croissante d'électricité négative. Si la surface intérieure de l'inducteur est en cuivre poli, le récepteur devient très-faiblement positif, ce qui prouve que le contact de l'eau et du cuivre donne une différence de potentiel très-faible. Mais, si l'intérieur du cylindre de cuivre a été chauffé par une lampe jusqu'à ce qu'il fût couvert d'une couche continue d'oxyde de cuivre, les gouttes sont alors électrisées positivement et la charge du récepteur croît rapidement.

Il suffit même d'employer un cylindre de zinc muni d'un entonnoir central en cuivre rempli de limaille de cuivre. Chaque grain de limaille qui s'échappe emporte de l'électricité négative que l'on peut accumuler sur un récepteur. Il serait facile d'ailleurs de multiplier ces effets en mettant le premier récepteur en communication avec un autre inducteur, et l'on ne tarderait pas à obtenir des étincelles.

892. Après toutes ces expériences, que nous ne voulons pas multiplier davantage, il est difficile de ne pas reconnaître que l'existence de l'électricité de contact est parfaitement démon-

trée. L'incrédulité de la plupart des physiciens qui refusent de l'admettre provient surtout de ce qu'on croit pouvoir en déduire quelque conséquence analogue à celle du mouvement perpétuel; mais nous avons vu que la loi de Volta n'exprime pas autre chose que l'impossibilité de produire de l'électricité sans travail. Lorsque deux plateaux hétérogènes sont mis en contact, par exemple, ils s'attirent sans doute par ce seul fait qu'ils sont électrisés en sens contraires ou portés à des potentiels différents; mais, pour utiliser cette électricité, il est nécessaire de séparer les plateaux et de vaincre précisément l'attraction électrique qui s'exerce entre eux. Il en est de même pour une aiguille d'acier que l'on met en contact avec un aimant : cette aiguille s'aimante elle-même, et l'énergie magnétique qu'elle acquiert est représentée par le travail que l'on est obligé de dépenser pour la détacher de l'aimant. L'électricité de contact est aussi impuissante que les aimants à produire un travail mécanique quelconque sans une dépense équivalente.

893. **Action des liquides.** — Il y a cependant dans les premières expériences de Volta, les seules que l'on cite habituellement, un point qu'il est important d'éclaircir. La lame de zinc étant en contact avec la main de l'opérateur ou avec une rondelle humide, Volta admet que l'humidité des doigts ou de la rondelle n'intervient pas d'une manière sensible dans le phénomène; Péclet a montré que le rôle de l'humidité est rarement négligeable et qu'il peut, dans certains cas, masquer complétement l'effet dû au contact des métaux.

Le plateau supérieur d'un électroscope étant en zinc et le plateau inférieur en verre doré, vernis tous deux sur les faces en regard, Péclet les réunit par les doigts mouillés; il obtint sur le plateau doré de l'électricité positive produisant une déviation de 20°; si les plateaux étaient réunis par un fil de métal, la déviation n'était plus que de 3°, et l'électricité négative. Il réunit de même avec les doigts deux disques, vernis, zinc et cuivre, puis les ayant séparés, il les mit en communication respective avec les deux plateaux d'un électroscope condensateur; après trois opérations semblables, il eut une déviation de 55° indiquant de l'électricité positive sur le cuivre. Si, au contraire, les disques étaient réunis par un fil de métal, la déviation après trois con-

tacts n'était plus que de 3° et le cuivre négatif. Il résulte de là que l'action de l'humidité doit toujours être éliminée quand on veut étudier le contact des métaux.

On peut ainsi disposer la première expérience de Volta de manière à éviter complétement l'influence de l'humidité; il suffit d'employer un électroscope condensateur dont l'un des plateaux A est en zinc et l'autre B en cuivre. Si l'on touche le plateau A d'une main et le plateau B avec une double lame cuivre et zinc que l'on tient par le zinc de l'autre main, on trouve sur le plateau de zinc de l'électricité positive qui ne peut être attribuée aux actions chimiques, puisqu'elles sont les mêmes de part et d'autre. Si, au contraire, on touche le plateau de cuivre d'une main et le plateau de zinc avec la double lame que l'on tient de l'autre main par le cuivre, on obtient le même résultat. Ici encore, les actions chimiques sont symétriques; elles sont même nulles, si l'on admet que le cuivre n'est pas sensiblement attaqué par l'humidité de la main.

On doit conclure de ces expériences que le contact d'un liquide avec un métal et, plus généralement, le contact de deux corps conducteurs quelconques, établit entre eux une tension électrique ou une différence de potentiel, avec cette restriction que les tensions des métaux entre eux suivent la loi de Volta, c'est-à-dire donnent une somme nulle dans une chaîne fermée, tandis que la loi n'est plus applicable aux contacts des liquides avec les métaux ou des liquides entre eux.

SÉRIES DE TENSIONS.

894. **Contact de deux métaux.** — Un problème important se présente maintenant : c'est de déterminer par expérience la valeur des tensions relatives au contact de tous les corps entre eux, et de réunir ces valeurs en tables.

Volta avait obtenu déjà pour un certain nombre de corps des résultats que l'on peut considérer seulement comme une première approximation, à cause de l'incertitude qui existe sur le rôle de l'humidité dans sa manière d'opérer. En représentant par 100 la différence de potentiel qui caractérise le contact du zinc

avec le cuivre, on déduit des expériences de Volta (885) les nombres suivants (on a calculé par la loi des tensions les résultats relatifs aux métaux qui n'avaient pas été observés directement avec le zinc) :

Zinc | Argent	109
Zinc | Cuivre	100
Zinc | Fer	82
Zinc | Étain	55
Zinc | Plomb	45

Volta indique encore l'or, le charbon, le graphite et le bioxyde de manganèse comme étant plus négatifs que l'argent, mais sans donner de résultats numériques.

Différents physiciens ont publié d'autres classifications des métaux qui s'accordent d'une manière générale avec la série de Volta ; ces classifications n'étaient pas le plus souvent appuyées sur des déterminations numériques, et il faut arriver aux expériences de M. Kohlrausch (1) pour trouver une méthode d'observation parfaitement correcte.

895. **Expériences de M. Kohlrausch.** — Les métaux que l'on veut étudier forment deux plateaux parallèles A et B (fig. 247) comme ceux d'un condensateur d'Œpinus. Les plateaux sont vissés à l'extrémité de tiges en métal *a* et *b* qui passent chacune dans l'axe d'un gros cylindre d'ébonite destiné à l'isoler ; ces cylindres sont portés par des pieds en métal P et Q, lesquels peuvent glisser à l'aide de coulisses sur une règle horizontale. Une vis V permet de donner au plateau A un petit déplacement autour d'un axe vertical, et une autre vis V' fait basculer le plateau B autour d'une horizontale, de sorte que les deux plateaux étant amenés dans le voisinage l'un de l'autre peuvent être rendus absolument parallèles. Enfin une tige mobile T vissée dans le pied de l'un des plateaux vient buter contre une autre tige U attachée à l autre plateau ; il suffit d'amener ces deux tiges en contact dans différentes expériences pour être sûr que la distance des plateaux n'est pas modifiée.

M. Kohlrausch s'est servi, comme appareil de mesures, d'un électromètre de Dellmann à fil de verre (295). Supposons, par

(1) *Pogg. Ann.* T. LXXXVII, p. 13 et LXXXVIII, p. 465.

exemple, que les plateaux A et B sont l'un en zinc et l'autre en platine. On les amène à une certaine distance et, après avoir réglé le parallélisme, on fait les expériences suivantes :

1° Les deux plateaux étant isolés et éloignés, on les rapproche et on les fait communiquer par un fil de métal. On les sépare ensuite et on met le plateau de zinc en communication avec l'électromètre. La charge électrique est proportionnelle à la racine carrée de la torsion nécessaire pour ramener l'aiguille mobile à sa direction primitive; mais, pour éviter la mesure de ces torsions qui est fastidieuse, on peut observer simplement l'arc d'impulsion initiale. Une table de graduation déterminée expérimen-

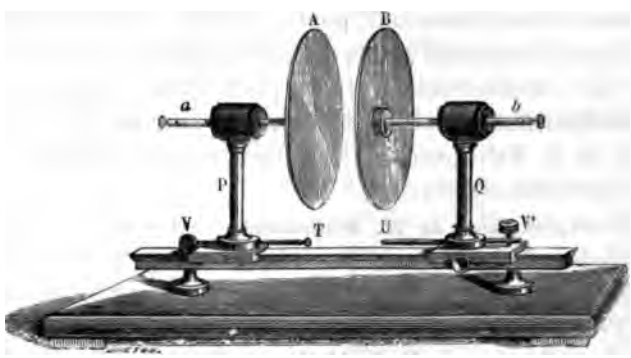


Fig. 247.

talement, s'il était nécessaire, permettrait de déduire la torsion d'équilibre de l'impulsion initiale; en réalité, l'arc d'impulsion est très-sensiblement proportionnel à la force électrique. Quel que soit d'ailleurs le mode d'observation, on obtient ainsi un nombre α proportionnel à la charge du plateau de zinc, et, par suite, proportionnel à la tension $Zn|Pt$; on peut donc écrire

$$Zn|Pt = K\alpha,$$

en désignant par K un coefficient constant qui disparaîtra dans la suite des expériences.

2° Les plateaux sont de nouveau rapprochés et mis en communication avec les deux pôles d'un couple Daniell formé d'une lame de zinc dans une dissolution de sulfate de zinc et d'une

cuivre dans une dissolution de sulfate de cuivre, les solutions étant séparées par un vase poreux. Soit F la ce des potentiels du cuivre et du zinc qui forment alors de cette pile. On met le plateau de zinc en communica- le pôle négatif (zinc) et le platine avec le pôle positif. ant alors les communications, puis séparant les pla- réunissant ensuite le zinc à l'électromètre, on obtient rge négative proportionnelle à β.
résulte l'équation

$$Pt|Cu + F = K\beta,$$

$$Pt|Zn + Zn|Cu + F = K\beta,$$
$$F + Zn|Cu - Zn|Pt = K\beta.$$

renverse les communications des plateaux avec le couple, tant la même expérience, on obtient une charge positive ondant à γ, ce qui donne

$$Zn|Cu + F + Zn|Pt = K\gamma.$$

la véritable différence de potentiel des pôles d'un couple ce qu'on appelle la *force électromotrice* de ce couple, e qui a lieu quand les deux pôles sont terminés par un nétal, cuivre, par exemple; c'est cette force électromo- ui intervient réellement dans les expériences, en particu- nd on ferme le circuit par un fil conducteur, puisqu'en ant alors les deux pôles on n'introduit plus de nouveau . Désignons-la par D, elle est égale à $F + Zn|Cu$; on a s trois équations :

$$Zn|Pt = K\alpha,$$
$$D - Zn|Pt = K\beta,$$
$$D + Zn|Pt = K\gamma.$$

éduit des deux dernières

$$D = K\frac{\gamma + \beta}{2},$$

$$Zn|Pt = K\frac{\gamma - \beta}{2};$$

ce qui donne

$$Zn|Pt = D\frac{\gamma-\beta}{\gamma+\beta}.$$

La première expérience fournit une équation de condition

$$\alpha = \frac{\gamma-\beta}{2}.$$

L'intervention du couple Daniell n'est pas nécessaire en théorie, puisque l'on pourrait se servir seulement de la première expérience; mais il faudrait alors que pour tous les autres métaux la distance des plateaux fut exactement la même, ce qui est très-difficile à réaliser, et il suffit d'un petit changement dans la distance pour causer de grandes erreurs, parce que la force condensante de l'appareil serait considérablement modifiée.

Toutefois, on admet encore que la force électromotrice de la pile de Daniell reste constante dans toutes les expériences, mais on peut aussi éliminer cette cause d'erreur. Pour cela, on emploie toujours deux systèmes de plateaux, l'un formé de zinc et de cuivre, l'autre de deux autres métaux, zinc et platine, par exemple, et l'on fait deux expériences successives assez rapprochées pour que le couple Daniell n'ait pas varié dans l'intervalle d'une manière appréciable. On a ainsi, pour le second système, une équation telle que

$$Zn|Pt = D\frac{\gamma-\beta}{\gamma+\beta}.$$

Le premier système donnant une autre équation semblable

$$Zn|Cu = D\frac{\gamma'-\beta'}{\gamma'+\beta'},$$

on en déduit

$$Zn|Pt = Zn|Cu \times \frac{\gamma-\beta}{\gamma+\beta} \times \frac{\gamma'+\beta'}{\gamma'-\beta'}.$$

Toutes les tensions sont ainsi rapportées à la tension du contact des deux métaux zinc et cuivre. En représentant encore cette tension par 100, M. Kohlrausch a obtenu dans deux séries d'expériences les résultats suivants :

MÉTAUX EN CONTACT	1re SÉRIE	2e SÉRIE
Zinc | Cuivre. .	100	100
Zinc | Or. . .	112,7	115
Zinc | Argent..	105,6	109
Zinc | Platine .	106,4	123
Zinc | Fer. . .	74,7	»

ur la seconde série d'expériences, on avait eu soin de polir ue fois la surface du zinc, tandis que, dans la première ; ce métal avait pu être un peu oxydé, ce qui suffit pour ex- ier la différence des résultats. Les plateaux d'or et d'argent nt formés de couches déposées par la galvanoplastie.

utes les tensions correspondent à un contact avec le zinc, on peut en déduire la tension de deux métaux quelcon- M et N à l'aide de la relation

$$M|N = M|Zn + Zn|N = Zn|N - Zn|M.$$

trouve ainsi :

MÉTAUX EN CONTACT	CALCUL	OBSERVATION
Fer | Cuivre. .	25,3	31,9
Fer | Platine. .	32,3	32,3
Fer | Or. . . .	38	39,7
Fer | Argent. .	30,9	29,8

s nombres calculés sont, comme on le voit, sensiblement à ceux que donne l'observation directe, sauf pour le pre- cas, où le défaut de concordance est trop grand.

s rapports de ces tensions à la force électromotrice d'un le Daniell peuvent se déduire des nombres suivants qui sont oyenne des expériences.

prenant pour le contact zinc-cuivre le nombre

$$Zn|Cu = 4{,}17,$$

on trouve

$$D = 8{,}68\,;$$

d'où l'on déduit

$$F = 4{,}51.$$

La tension du contact Zinc|Cuivre est donc à peu près la moitié de la force électromotrice d'un couple Daniell, ce qui est conforme aux observations de M. Thomson (890).

Nous avons supposé qu'on mettait toujours le plateau de zinc en communication avec l'électromètre, mais on peut mettre aussi bien l'autre plateau, puisque les deux charges sont sensiblement égales ; le nouveau contact qui en résulterait n'a aucune importance, puisqu'il ne se fait plus de condensation quand les plateaux sont séparés.

D'ailleurs, pour donner une idée de la marche des expériences, nous reproduirons les nombres mêmes qui ont été obtenus dans deux séries d'observations :

1er CONDENSATEUR. — ZINC-PLATINE.

CHARGES	PLATEAUX		MOYENNE	
	ZINC	PLATINE		
α	4,46	4,46	4,46	$\frac{\gamma-\beta}{2} = 4{,}52$
β	3,01	2,92	2,965	
γ	11,98	12,02	12	$\frac{\gamma+\beta}{2} = 7{,}48$

2e CONDENSATEUR. — ZINC-CUIVRE.

CHARGES	PLATEAUX		MOYENNE	
	ZINC	CUIVRE		
α'	3,92	4,05	3,985	$\frac{\gamma'-\beta'}{2} = 3{,}99$
β'	3,15	3,01	3,08	
γ'	11,1	11,02	11,06	$\frac{\gamma'+\beta'}{2} = 7{,}07$

On voit que l'équation de condition est vérifiée, et il en résulte

$$Zn|Pt = Zn|Cu \times \frac{4,52}{7,48} \times \frac{7,07}{3,99} = Zn|Cu \times 1,07,$$

$$D = Zn|Cu \times \frac{7,07}{3,99} = Zn|Cu \times 1,77.$$

896. **Expériences de M. Hankel.** — Les expériences de M. Kohlrausch ne sont pas très-nombreuses et ne présentent pas toujours entre elles un accord suffisant ; M. Hankel (1) les a reprises par une méthode peu différente. Deux plateaux de cuivre rouge, de 95^{mm} de diamètre, sont disposés horizontalement l'un au-dessus de l'autre. Le plateau supérieur A, bien poli sur ses deux faces, est porté par trois fils isolants et peut être élevé à des hauteurs différentes tout en restant parfaitement horizontal. Sur le plateau inférieur B on pose une plaque d'un métal M quelconque, que l'on rend aussi horizontale à l'aide d'un niveau.

L'appareil de mesure est un électromètre formé d'une feuille d'or (272) située entre deux plateaux mobiles qui communiquent avec les deux pôles d'une pile. Nous avons vu que le déplacement de la feuille d'or est sensiblement proportionnel à son potentiel absolu, du moins entre certaines limites, et à la différence de potentiel des deux plateaux, c'est-à-dire de la pile auxiliaire. On mesure d'ailleurs le double du déplacement de cette feuille, en intervertissant par un commutateur les communications des plateaux de l'électromètre avec les pôles de la pile, de manière à doubler la précision et à éliminer l'observation de la feuille à l'état neutre.

Voici maintenant la marche des expériences :

Le plateau mobile A étant amené à une certaine distance de la plaque de métal M, 1 millimètre environ, distance que l'on mesure avec un microscope, on relie les plateaux A et B par un fil métallique que l'on fait communiquer avec le sol : la charge du premier est alors proportionnelle à la différence de potentiel due au contact des deux métaux A et M. On supprime la communication, puis on soulève le plateau A à une distance de 330 millimètres, où il touche un fil de platine qui le met en communication avec la feuille d'or de l'électromètre, et on observe le double du

(1) *Pogg. Annal.*, t. CXV, p. 57 et t. CXXVI, p. 286.

déplacement de cette feuille α. Ce déplacement est proportionnel à la tension $A|M$; mais, pour éviter les causes d'erreur systématiques de l'appareil, telles qu'une mauvaise communication avec le sol, et rendre toutes les expériences comparables entre elles, on remplace ensuite le métal M par un autre métal M' que l'on amène à la même distance, et, répétant les mêmes opérations, on obtient ainsi un autre déplacement α'. La différence des deux nombres est proportionnelle à la différence des tensions de contact des métaux M et M' avec le premier, et l'on peut écrire

$$A|M - A|M' = K(\alpha - \alpha').$$

On a d'ailleurs, d'après la loi de Volta,

$$M'|M = M'|A + A|M = A|M - A|M' = K(\alpha - \alpha').$$

Il suffit maintenant de former la plaque M successivement avec chacun des métaux que l'on veut étudier, pour déterminer les tensions de contact de tous les métaux combinés entre eux d'une manière quelconque.

Voici le résumé des mesures de M. Hankel :

Aluminium | Zinc. . . .	25	Zinc | Fer.	84
Zinc | Étain.	23	Zinc | Cuivre.	100
Zinc | Cadmium	24	Zinc | Or.	110
Zinc | Plomb.	44	Zinc | Palladium. . . .	115
Zinc | Antimoine. . . .	69	Zinc | Argent.	118
Zinc | Bismuth	72	Zinc | Charben	122
Zinc | Mercure.	81	Zinc | Platine	125

M. Hankel a constaté aussi que l'action de l'air, et même la manière dont les surfaces ont été travaillées, exercent une influence considérable sur les tensions de contact. On n'obtient de résultats concordants que si l'on fait les mesures aussitôt après avoir poli les surfaces avec le plus grand soin ; même avec ces précautions, il est encore difficile d'éviter les irrégularités d'une manière absolue. Le tableau suivant, qui renferme les nombres observés directement, montre que plusieurs circonstances, en apparence insignifiantes, peuvent apporter des modifications profondes dans les résultats et même changer l'ordre des métaux dans le classement général.

MÉTAUX	LIMÉS	POLIS	APRÈS 1 OU 2 JOURS	APRÈS 7 JOURS	APRÈS 2 MOIS	DIFFÉRENCE MAXIMUM
Aluminium. . .	209	225 à 220	»	165	140	85
Zinc amalgamé.	»	200	»	»	»	»
Zinc	192	200	188	»	157	43
Etain.	177	»	»	164	152	25
Cadmium. . .	175	181	164	164	139	42
Plomb.	151	156	»	135	151	21
Antimoine. . .	131	131	»	121	113	18
Bismuth. . . .	118	130	116	110	106	22
Maillechort. . .	»	125	»	»	105	20
Laiton.	»	122	110	»	»	»
Mercure. . . .	»	119	60	»	»	59
Fer.	»	116	»	100	95	21
Acier.	»	116 à 108	»	»	93	16
Fonte.	»	116 à 108	»	»	96	12
Cuivre.	»	100	»	86	»	14
Or.	»	90	»	81	»	19
Palladium. . .	»	85	»	»	»	»
Argent. . . .	»	82	»	70	82	12
Charbon. . . .	»	78	»	78	»	»
Platine. . . .	»	77	»	»	»	»

897. **Contact d'un métal et liquide.** — Pour déterminer les actions électriques produites par le contact des métaux et des liquides, M. Becquerel (1) se servait d'un électroscope condensateur à pile sèche très-sensible. Le liquide étant placé dans une capsule de métal posée sur le plateau supérieur, on touchait le plateau inférieur d'une main ; avec l'autre main, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un morceau de baudruche, on mettait le liquide en communication avec le sol ; puis, après quelques instants, on supprimait les communications et, séparant les plateaux, on observait le signe électrique de la feuille d'or. M. Becquerel a reconnu ainsi que les solutions alcalines deviennent positives quand on les met en contact avec certains métaux, comme le zinc, le platine et le cuivre ; que les métaux prennent en général de l'électricité positive au contact des acides ; que l'argent est à peu près neutre en présence des alcalis ou des acides, et que le cuivre devient négatif quand on le plonge dans une dissolution de sel marin.

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXV, p. 405.

Péclet (1) a fait plusieurs expériences analogues au moyen d'un électroscope à plateaux de verre doré. Il mettait par une main le plateau inférieur en communication avec le sol; de l'autre main, humectée du liquide à étudier, il tenait la lame de métal qu'il appliquait sur le plateau supérieur. Il supprimait ensuite les contacts au bout de quelques instants, séparait les plateaux et observait l'état électrique des feuilles.

Voici quelques-uns des résultats. Les différents nombres représentent la divergence des feuilles d'or, et le signe indique la nature de l'électricité dont elles étaient chargées; c'est aussi le signe de l'électricité qui se produit sur le liquide de la main mouillée. Les dissolutions acides renfermaient $\frac{1}{50}$ d'acide concentré, la solution de potasse contenait $\frac{1}{20}$ de potasse pure, et la solution de sel marin était saturée.

MÉTAUX	EAU	ACIDE SULFURIQUE	ACIDE NITRIQUE	ACIDE CHLORHYDRIQUE	POTASSE	SOLUTION DE SEL MARIN
Zinc	+ 26	+ 27	+ 26	+ 26	+ 30	+ 25
Mercure	26	27	21	20	28	22
Plomb	17,5	14	13	13	24	14
Étain	15	16	12	12	28	15
Fer	11,5	13	8	11	19,5	15
Antimoine	8,7	7	1	5	21,5	7
Bismuth	7,5	4	1	5	17	6
Cuivre	7,5	2,5	»	5	— 11,5	6
Nickel	10	3	0,5	6	+ 10	6
Argent	»	»	— 2	— 3	3,5	2,5
Platine	»	— 6	— 4	— 2	5	»
Or	»	— 4	— 4	— 0,5	5	— 4
Charbon	»	— 3	— 3	— 4	4	— 2

Ces résultats de Péclet ne s'accordent pas en général avec ceux qui ont été observés par M. Becquerel, et il n'y a pas lieu de s'en étonner. Dans les deux cas, en effet, la communication des plateaux de l'électroscope se faisait par l'intermédiaire d'un conducteur très-complexe, puisque le corps de l'observateur lui-même faisait partie du circuit; l'humidité des mains intervenait ainsi dans le phénomène d'une manière inconnue, et l'on ne

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. II, p. 238.

pouvait en déduire aucune conséquence certaine relativement au contact du métal et du liquide.

898. La méthode suivante, employée par M. Buff (1), est plus correcte, mais elle ne permet encore de déterminer que le sens du phénomène.

Le plateau inférieur d'un électroscope condensateur étant en zinc, par exemple, on le recouvre d'une lame de verre vernie sur ses deux faces et on verse à la partie supérieure une certaine quantité de liquide, de manière à former une nappe largement étalée. On relie ensuite par un fil de zinc le liquide supérieur avec le plateau inférieur, puis on supprime les communications et on enlève la lame de verre : les pailles divergent et sont chargées d'électricité positive ou négative, suivant que le zinc est positif ou négatif par rapport au liquide.

Si l'on veut étudier le contact d'un autre métal M avec le même liquide, on remplace d'abord le fil de zinc par un fil de ce métal et l'on répète la même expérience ; on obtient ainsi une déviation des pailles α proportionnelle à la somme des deux tensions du zinc par rapport au métal et du métal par rapport au liquide L.

$$Zn|M + M|L = K\alpha.$$

On substitue ensuite à la goutte de liquide une lame du métal à étudier, et la nouvelle déviation β donne

$$Zn|M = K\beta ;$$

on en déduit

$$M|L = K(\alpha - \beta).$$

Cette relation ne serait absolument exacte que si le liquide et le métal que l'on compare avaient des surfaces absolument égales et situées à la même distance du plateau inférieur, pour que la capacité de l'électroscope soit constante dans toutes les expériences. Si cette condition n'est pas réalisée, on peut faire des erreurs considérables sur la valeur et même sur le signe des différences de potentiel.

Voici les principaux résultats observés par M. Buff :

(1) *Ann. der Chemie und Pharmacie*, t. XLII, p. 5, et t. XLV, p. 137.

NATURE DU LIQUIDE	MÉTAUX	SIGNE DU MÉTAL	OBSERVATIONS
Eau pure.	Zinc. Cuivre. Platine.	— — - -	Électrisation forte. Id. faible.
Potasse.	Tous les métaux.	—	
Acide sulfurique étendu.	Zinc, fer, cuivre. Or, platine.	— +	Le zinc est aussi électrisé, et le cuivre l'est moins qu'avec l'eau.
Acide azotique étendu.	Zinc, fer. Cuivre. Or, platine.	— 0 +	Moins qu'avec l'ac. sulfuriq.
Acide azotique ordinaire.	Zinc, fer. Cuivre, or, platine.	— +	Moins qu'avec l'acide étendu.
Acide azotique fumant.	Zinc. Fer, cuivre, or, platine.	— +	Très-faiblement.
Solution concentrée de sulfate de zinc.	Zinc. Cuivre. Platine.	— — +	Charge forte. » faible.

On voit, d'après ce tableau, que les effets sont à peu près les mêmes avec l'eau ou l'acide sulfurique, et qu'au contact de l'acide azotique les métaux ont d'autant plus de tendance à s'électriser positivement que l'acide est plus concentré. Il est à remarquer surtout que le cuivre est neutre avec l'acide azotique étendu, bien que l'action chimique qui a lieu entre ces deux corps soit très-énergique. C'est là une circonstance importante à signaler dans la discussion relative à l'origine de l'électricité. Ainsi, on dit souvent que l'expérience de la double lame de Volta ne donne pas d'électricité quand on tient le cuivre à la main parce que l'action chimique est nulle, et que, si on mouille les doigts avec de l'acide nitrique, le cuivre étant attaqué prend de l'électricité négative qu'il communique au plateau correspondant. Les expériences de Péclet et de M. Buff montrent, au contraire, que la lame de cuivre est alors neutre ou même positive, si l'acide dont on a humecté les doigts est concentré.

899. **Expériences de M. Hankel.** — M. Hankel a étudié la même question par la méthode qu'il avait employée pour les tensions des métaux. Son appareil à contacts se compose principalement d'un large entonnoir A (fig. 248) communiquant par un tube avec un petit vase latéral muni d'une pointe de métal l qui sert à marquer le niveau du liquide dans les différentes expériences. Dans ce vase on plonge une lame M du métal à étudier; cette lame peut être reliée par un fil de platine p avec un plateau de cuivre B disposé horizontalement au-dessus de l'entonnoir. Un autre fil de platine p' permet de relier le plateau à la feuille d'or de l'électromètre. Enfin, on maintient aussi la lame de métal M en communication permanente avec le sol par un fil de platine p''.

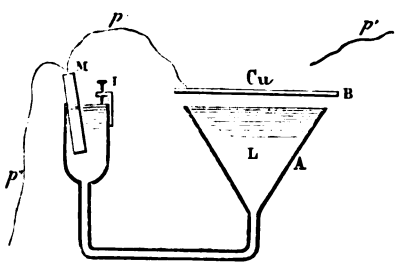


Fig. 248.

Dans une première expérience, le plateau B et la lame M communiquent, l'entonnoir étant rempli d'un liquide L; on supprime la communication et, soulevant le plateau B, on le relie à la feuille d'or par le fil p'. Après avoir manœuvré le commutateur à la manière ordinaire, on obtient une double déviation α, qui correspond à la somme des contacts $Cu\,|\,Pt + Pt\,|\,M + M\,|\,L$, ce qui donne simplement, en vertu de la loi de Volta,

$$Cu\,|\,M + M\,|\,L = K\alpha.$$

On vide l'entonnoir et on le recouvre d'une lame de métal M que l'on fait communiquer avec le sol et avec le plateau supérieur par des fils de platine. En opérant à la même distance, on a un déplacement β, qui correspond au contact des métaux,

$$Cu\,|\,M = K\beta;$$

d'où l'on tire

$$M\,|\,L = K(\alpha - \beta).$$

On remplace enfin cette lame de métal par une lame de zinc,

et l'on obtient de même

$$Cu\,|\,Zn = K\gamma;$$

on en déduit

$$Cu\,|\,M - Cu\,|\,Zn = Zn\,|\,M = K(\beta - \gamma).$$

On a ainsi tous les éléments nécessaires pour comparer les tensions de contact $Cu\,|\,M$, $Zn\,|\,M$ et $M\,|\,L$ du métal considéré avec le zinc, le cuivre et le liquide.

900. L'électricité produite par le contact d'un liquide et d'un métal n'est pas le même au début de l'expérience qu'au bout d'un certain temps ; la surface immergée du métal s'altère peu à peu et s'entoure d'une couche liquide différente de la masse générale, de sorte que la tension de contact se modifie plus ou moins rapidement. On le démontre de la manière suivante.

On prend deux plateaux, l'inférieur A en cuivre, le supérieur B en cuivre aussi, mais couvert d'une feuille de platine sur sa face inférieure. Ces deux plateaux étant amenés à une certaine distance, réunis par un fil de platine qui communique avec le sol, puis isolés et séparés, on obtient, en reliant le plateau supérieur à l'électromètre, une déviation α qui correspond au contact du cuivre et du platine

$$Pt\,|\,Cu = K\alpha.$$

Dans une deuxième expérience, on met le plateau inférieur A en communication avec une lame de cuivre Cu_1 plongeant dans l'eau où elle a séjourné quelque temps, et, au moment de faire l'observation, on plonge dans cette eau une autre lame de cuivre fraîche Cu, qui communique par des fils de platine avec le sol et avec le plateau supérieur B. On supprime immédiatement les communications et on obtient de même une déviation β dans l'électromètre. En suivant l'ordre des contacts, à partir du plateau supérieur, on voit que la charge électrique correspond aux tensions suivantes :

$$Pt\,|\,Cu + Cu\,|\,Aq + Aq\,|\,Aq_1 + Aq_1\,|\,Cu_1 + Cu_1\,|\,Cu = K\beta,$$

Aq_1 et Cu_1 désignant l'eau et le cuivre modifiés par un contact prolongé. On en déduit, par différence,

$$Cu\,|\,Aq + Aq\,|\,Aq_1 + Aq_1\,|\,Cu_1 + Cu_1\,|\,Cu = K(\beta - \alpha).$$

Comme les deux nombres α et β ne sont généralement pas égaux, le premier membre de l'équation n'est pas nul, ce qui démontre l'influence du contact prolongé.

L'état physique du métal immergé a aussi une grande importance; le changement qui résulte de l'immersion prolongée, suivant que les métaux sont polis ou limés, se produit d'une manière plus ou moins rapide; la tension peut même croître d'abord pour décroître ensuite, ou inversement.

De même, un métal oxydable, exposé d'abord à l'air humide avant d'être plongé dans l'eau, ne donnera pas le même résultat que si on l'avait immergé immédiatement après avoir décapé la surface; il y aura alors un double contact entre le métal et la couche oxydée, puis entre l'oxyde et l'eau.

On voit que les causes d'erreur sont encore plus nombreuses que pour le contact des métaux entre eux, et combien il est difficile d'obtenir des résultats bien concordants ou même parfaitement définis. Nous emprunterons aux expériences de M. Hankel, comme exemples, quelques nombres qui indiquent la tension de contact de différents métaux avec l'eau, en fonction de la tension du contact $Zn \mid Cu$ représentée par 100. La série de points indique une modification graduelle de la tension.

MÉTAUX	AU MOMENT DE L'IMMERSION	APRÈS QUELQUE TEMPS 10 A 30′	MÉTAL EXPOSÉ A L'AIR	MÉTAL SÉCHÉ APRÈS AVOIR ÉTÉ IMMERGÉ
Cuivre. . . .	+ 9	— 8	9... — 8	— 14... — 1
Platine. . . .	+ 14	— 16	»	0... + 18
Argent. . .	+ 8	— 7	»	— 7
Or.	+ 10	— 16	— 19	— 19
Fer.	+ 9	+ 27	— 10... + 15	— 23... + 19
Étain poli. . .	+ 4	— 15	— 9 à — 22	— 29... — 40
Étain limé. . .	— 30	— 10	»	»
Plomb.	— 6	— 8	— 15 à — 19	— 15 à — 19
Zinc poli. . .	— 16	— 26 à — 20	— 32 à — 23	— 45... — 22
Zinc amalgamé.	— 6	— 25 à — 18	»	»
Mercure. . . .	— 6	— 30	»	»

Il résulte de ce qui précède, comme l'avait reconnu Volta, que la loi des tensions ne s'applique pas au contact des liquides

avec les métaux. On a, en effet, d'après les nombres de M. Hankel,

$Zn \mid Cu = 100$	$Zn \mid Aq + Aq \mid Cu = -25$
$Zn \mid Au = 110$	$Zn \mid Aq + Aq \mid Au = -26$
$Zn \mid Ag = 118$	$Zn \mid Aq + Aq \mid Ag = -24$
$Zn \mid Pt = 123$	$Zn \mid Aq + Aq \mid Pt = -30$

Des recherches plus récentes de M. Gerland (1) conduisent à des résultats tout à fait analogues.

901. **Deux métaux et un liquide.** — La présence d'un liquide entre deux métaux différents dans une chaîne de corps conducteurs interrompt l'application de la loi de Volta, de sorte que, si les extrémités de la chaîne sont formées par deux lames d'un même métal, la somme totale des tensions de contact pourra n'être pas nulle. Si l'on réunit ces lames extrêmes par un fil extérieur d'un métal quelconque, on n'introduira plus de nouveau contact efficace, et ce fil sera traversé par un flux d'électricité, comme par la décharge d'une batterie. La différence de potentiel des lames extrêmes se rétablissant d'une manière continue et plus ou moins rapide, en même temps que des réactions chimiques s'accomplissent entre les métaux et le liquide, le fil extérieur pourra être considéré comme parcouru par un courant continu d'électricité positive allant d'une lame à l'autre, et par un courant contraire d'électricité négative. Ce fil jouit alors de la propriété de dévier l'aiguille aimantée, de sorte qu'on pourra avoir recours au galvanomètre pour indiquer l'existence et le sens des différences de potentiel.

Considérons, par exemple, la double lame de Volta, formée d'un disque de zinc et d'un disque de cuivre soudés entre eux, et appliquons sur le cuivre une rondelle de drap humide. La différence des potentiels du zinc et du drap a pour expression

$$Zn \mid Cu + Cu \mid Aq.$$

Cette différence de potentiel ne peut pas être utilisée telle quelle dans un circuit fermé, parce qu'il faut établir une communication extérieure entre le zinc et le drap mouillé, et introduire au moins un nouveau contact. Si nous mettons une seconde

(1) *Pogg. Annal.*, t. CXXXIII, p. 513.

lame de zinc sur le drap, la différence de potentiel des lames extrêmes sera

$$Zn\,|\,Cu + Cu\,|\,Aq + Aq\,|\,Zn.$$

Les lames de zinc extrêmes, n'étant pas au même potentiel, pourront être mises en communication par un fil extérieur d'un métal quelconque et donner lieu à un courant continu.

902. **Force électromotrice.** — C'est cet ensemble qu'on appelle un *couple* ou un *élément* de Volta, mais il vaudrait mieux réserver le nom d'éléments aux différentes pièces qui constituent le couple; la différence de potentiel des métaux extrêmes est la *force électromotrice* du couple.

En prenant les nombres suivants pour les différents contacts,

$$\begin{aligned} Zn\,|\,Cu &= 100,\\ Cu\,|\,Aq &= 9,\\ Aq\,|\,Zn &= 16, \end{aligned}$$

la force électromotrice du couple de Volta sera représentée par 125, tandis que la différence de potentiel du zinc et du drap est de 109. Si l'on admet que le liquide n'a pas d'influence, la force électromotrice sera égale à la tension de contact des métaux, c'est-à-dire à 100 ; enfin elle serait seulement égale à 25, si l'on ne tenait compte que de l'action du liquide.

Au point de vue des applications, il est indifférent de se préoccuper ou non du contact des métaux : la seule quantité que l'on détermine en bloc est la force électromotrice résultante, sans faire le départ de ce qui appartient à chacun des contacts. Cette quantité peut être mesurée, d'ailleurs, avec beaucoup plus de précision que les tensions de contact des métaux entre eux, et surtout celles des liquides avec les métaux, et elle n'est pas sujette à éprouver d'aussi grandes modifications sous l'influence de diverses circonstances.

903. A ce propos, nous pouvons encore revenir sur quelques expériences réalisées par Faraday (1) dans le but de démontrer la non-existence de l'électricité de contact. L'objection principale que l'on oppose à la théorie de Volta consiste en ceci : qu'il est impossible d'obtenir un courant continu dans un circuit fermé,

(1) *Experimental Researches*, t. II, p. 18.

sans qu'il existe en même temps des opérations chimiques dont le travail est, pour Faraday, la cause du développement d'électricité. Il est clair qu'il ne peut pas exister de courant continu dans un circuit entièrement métallique dont tous les points sont à la même température; ce serait le mouvement perpétuel, dont la loi de Volta est précisément la négation. Si le circuit n'est pas entièrement métallique, la somme algébrique des tensions, ou la force électromotrice, n'est plus nulle; alors, à moins d'admettre que quelque chose puisse provenir de rien, il faut bien que le travail effectué par le courant électrique soit accompagné en quelque point du circuit par une dépense équivalente. Démontrer qu'à température constante il n'y a pas de courant possible dans un circuit fermé, sans actions chimiques, c'est donc simplement démontrer dans un cas particulier l'impossibilité du mouvement perpétuel; mais toutes les objections de cette nature ne peuvent pas infirmer l'existence de l'électricité de contact. C'est à cela, en définitive, que se résument les expériences de Faraday, si l'on ne veut pas en faire l'objet d'une discussion oiseuse sur la question de distinguer, entre deux phénomènes simultanés et inséparables, lequel est la cause et lequel est l'effet.

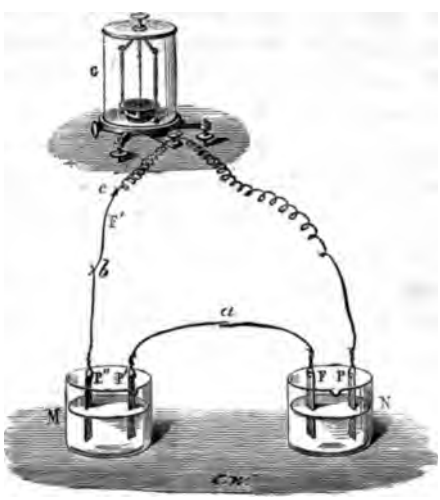


Fig. 249.

Faraday a cherché d'abord des liquides bons conducteurs qui n'eussent pas d'action chimique sensible sur les métaux; la dissolution de sulfure de potassium est celle qui paraît le mieux réaliser cette condition. Un circuit formé d'une lame de platine et d'une lame de fer plongées dans une dissolution de sulfure de potassium, et communiquant avec le fil d'un galvanomètre, ne donne pas de courant appréciable. Cette expérience prouve simplement que les trois tensions de

contact des métaux entre eux et avec le liquide donnent une somme algébrique nulle, et qu'on a

$$(1) \qquad Pt\,|\,Fe + Fe\,|\,KS + KS\,|\,Pt = 0.$$

Faraday place ensuite dans un même circuit une dissolution de sulfure de potassium N (fig. 249), dans laquelle plongent deux lames de platine et de fer, P et F, puis une dissolution semblable M dans laquelle sont deux lames de platine P′ et P″, puis un galvanomètre G, dont on peut supposer que la bobine est formée par un fil de platine, et enfin un fil de fer F′ entre les deux conducteurs de platine P et P″. Il y a ainsi trois contacts du fer avec le platine, l'un a entre F et P′, et deux autres b et c entre P″ et P. Le courant est encore nul, mais l'expérience est exactement la même que la précédente. On a, en effet, en suivant l'ordre des contacts de P″ à P à travers les liquides,

$$(2) \qquad Pt\,|\,KS + KS\,|\,Pt + Pt\,|\,Fe + Fe\,|\,KS + KS\,|\,Pt = 0,$$

équation identique à la première, puisque les deux premiers termes sont égaux et de signes contraires.

On obtient maintenant un courant si l'on interpose une rondelle humide en a, b ou c, entre le fer et le platine. Faraday attribue le courant à l'action chimique que l'eau exerce alors sur le fer ; cette action existe, en effet, mais la somme des tensions n'est plus nulle, et la force électromotrice a pour valeur

$$(3) \qquad E = Pt\,|\,Fe + Fe\,|\,Aq + Aq\,|\,Pt.$$

Faraday remplace ensuite dans la première expérience la lame de fer F par une lame de nickel, et constate que le courant est encore nul. Il résulte de là

$$(4) \qquad Pt\,|\,Ni + Ni\,|\,KS + KS\,|\,Pt = 0.$$

En comparant les équations (1) et (4), on en déduit par soustraction

$$Ni\,|\,Fe + Fe\,|\,KS + KS\,|\,Ni = 0\,;$$

cette équation signifie que l'on pourrait aussi bien remplacer le platine par du nickel, sans qu'il y eût encore de courant appréciable.

Toutes les expériences analogues s'interpréteraient de la même manière, sans fournir jamais un argument concluant contre l'électricité de contact. En outre, Faraday lui-même fait remarquer que, dans les cas semblables à ceux qui précèdent, le courant n'est presque jamais absolument nul au début : l'aiguille du galvanomètre éprouve d'abord une petite déviation et ne revient au zéro qu'au bout d'un certain temps; cela signifie que la somme des tensions de contact n'est pas nulle d'abord et que les surfaces se modifient peu à peu, comme nous l'avons vu dans les expériences de M. Hankel. Les lames de métal immergées sont alors dans un état particulier qu'on appelle la polarisation des électrodes, et sur lequel nous reviendrons.

Il arrive souvent, en effet, qu'un circuit ouvert donne lieu à une force électromotrice et que cette force s'annule rapidement après la fermeture du circuit, à cause même des réactions qui se sont accomplies dès le début. Ces réactions sont de deux espèces : les unes dépensent du travail sous forme de chaleur ou autrement, les autres en produisent. Comme le passage du courant dégage dans le fil et dans le liquide conducteur une certaine quantité de chaleur, il faut, pour que ce courant persiste, que le travail total des actions chimiques soit positif. Toutes les fois qu'un circuit est composé de telle façon que le travail des actions chimiques qui peuvent s'effectuer n'est pas supérieur au travail des décompositions qu'entraînerait le passage d'un courant, le courant ne peut pas se produire, au moins d'une manière permanente; s'il existe au moment de la fermeture du circuit, par suite d'une inégalité entre les tensions de contact, il ne tarde pas à s'arrêter. Les travaux de M. Favre ont bien mis en évidence les relations qui existent entre les forces électromotrices des couples électriques et les quantités de chaleur dégagées ou absorbées en différents points du circuit.

904. **Contact des liquides.** — Les tensions de contact des liquides entre eux ne suivent pas non plus la loi de Volta et peuvent donner lieu à une force électromotrice dans un circuit fermé. Pour éviter l'influence des métaux qui interviennent dans la constitution du circuit, on fait en sorte qu'il y ait deux contacts identiques et de sens contraires entre un liquide et un métal.

Considérons, par exemple, deux vases A et B renfermant un

même liquide L, dans lesquels plongent des lames d'un même métal, de platine, par exemple. Si l'on fait ensuite communiquer les liquides des deux vases par un autre liquide quelconque L', sans nouveau contact métallique, il est aisé de voir que les deux lames de platine seront au même potentiel, car d'une lame à l'autre on rencontre la série des tensions

$$Pt\,|\,L+L\,|\,L'+L'\,|\,L+L\,|\,Pt,$$

dont la somme est identiquement nulle.

Supposons maintenant qu'on établisse la communication des vases A et B par une chaîne formée de deux liquides différents L' et L''; les tensions de contact sont alors

$$Pt\,|\,L+L\,|\,L'+L'\,|\,L''+L''\,|\,L+L\,|\,Pt=L\,|\,L'+L'\,|\,L''+L''\,|\,L.$$

Cette somme n'est pas nécessairement nulle, elle représente la force électromotrice qui existe entre les deux lames de platine; il se produira en général un courant quand on réunira ces lames par un fil métallique.

On voit que l'existence d'une force électromotrice entre liquides, sans faire intervenir aucun contact métallique, exige au moins que l'on emploie trois liquides différents; c'est pour n'avoir pas pris cette précaution que l'on a cru quelquefois vérifier par expérience la loi de Volta entre les liquides.

905. Nobili [1] a obtenu ainsi un courant par l'action de liquides seuls. Il prit, par exemple, pour liquides extrêmes des solutions de nitre, comme intermédiaires l'acide azotique et un bâton de potasse humectée, et il établit les communications des liquides entre eux par des arcs d'amiante ou de coton. L'aiguille d'un galvanomètre, installé sur le circuit extérieur, fut fortement déviée, indiquant un courant qui allait de la potasse à l'acide par le liquide, ou de l'acide à la potasse par le galvanomètre. On avait donc

$$KO.Az\,O^5\,|\,Az\,O^5+Az\,O^5\,|\,KO+KO\,|\,KO.Az\,O^5>0.$$

Nobili indique encore plusieurs autres chaînes de liquides, acides, bases ou dissolutions salines, qui donnent lieu à des courants continus.

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXXVIII, p. 239.

Fechner (1) s'est servi de la même méthode. Un premier liquide L était placé dans deux vases extrêmes A et B où plongeaient des lames de platine; deux vases intermédiaires A′ et B′ contenaient deux autres liquides L′ et L″, et les communications d'un liquide à l'autre étaient établies par de petits siphons en verre. Fechner s'est borné en général à indiquer le sens du courant.

906. La disposition imaginée par M. Wild (2) est un peu plus simple. Un vase en bois V (fig. 250) est muni de deux tubes de verre verticaux, fermés à la partie inférieure par des plaques M et M′ d'un même métal. Les deux tubes contiennent à la partie inférieure deux colonnes A et B d'un même liquide L, et ces colonnes sont réunis par deux couches A′ et B′ de deux liquides différents L′ et L″. Les plaques métalliques qui terminent les tubes étant mises en communiquant avec un galvanomètre très-sensible, la déviation de l'aiguille indique le signe de la force électromotrice E qui résulte des contacts entre les trois liquides.

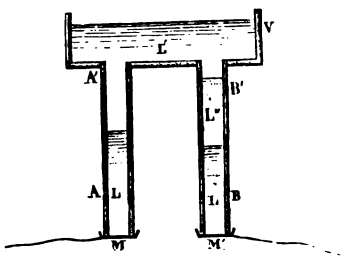


Fig. 250.

$$E = L|L' + L'|L'' + L''|L.$$

On voit d'ailleurs que la même disposition permettrait de mettre dans le circuit un plus grand nombre de liquides différents, superposés dans l'ordre des densités.

Les expériences ont donné les résultats suivants :

1° Une série quelconque de liquides ne suit pas en général la loi de Volta, et les forces électromotrices des dissolutions dépendent du degré de concentration. Voici quelques exemples: dans le tableau qui suit, la série formée par les liquides compris dans une même colonne verticale, lorsque les densités ont les valeurs indiquées en regard, donne un courant qui traverse les liquides de haut en bas.

(1) *Pogg. Ann.*, t. XLVIII, p. 1 et 225.
(2) *Pogg. Annal.* T. CIII, p. 353. — *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LIII, p. 375.

LIQUIDES	DENSITÉ	LIQUIDES	DENSITÉ	LIQUIDES	DENSITÉ
Sulfate de zinc. .	1,20	Sulfate de zinc. .	1,20	Sulfate de cuivre.	1,10
Sulfate de cuivre.	1,10	Acide sulfurique.	1,05	Sulfate de potasse.	1,07
Eau.	1	Sulfate de cuivre.	1,10	Acide azotique. .	1,05
Sulfate de zinc. .	1,20	Sulfate de zinc. .	1,20	Sulfate de cuivre.	1,10

2° Tous les sulfates neutres de la formule MO. SO^3, à l'exception du sulfate d'ammoniaque, satisfont entre eux à la loi de Volta. Il en est de même pour le chlorure, le bromure et l'iodure de potassium.

3° La loi, au contraire, ne se vérifie pas pour les acides entre eux, ni pour les sulfates de sesquioxydes de la forme M^2O^3. $3SO^3$ combinés entre eux ou avec les sulfates de protoxydes MO. SO^3, ni pour les chlorures et les sulfates, etc.

Il n'y a donc en réalité qu'un très-petit nombre de cas où la loi de Volta soit applicable aux liquides, et encore est-il permis de supposer qu'il serait possible de manifester une force électromotrice avec des procédés d'observation plus délicats. Il existe des relations intimes entre les tensions de contact des liquides et les phénomènes calorifiques auxquels donnent lieu les réactions de ces corps entre eux.

907. M. Branly (1), en évaluant directement les différences de potentiel, a vérifié de plusieurs manières que, si l'on emploie trois colonnes liquides dont les deux extrêmes sont identiques, la nature du liquide intermédiaire n'a aucune influence.

Dans un grand vase en verre V contenant de l'acide sulfurique étendu, M. Branly place quatre vases poreux, dont deux A et A′ renferment la même solution d'acide sulfurique, et deux autres B et B′ de l'acide azotique étendu. Des lames de zinc sont plongées dans les vases A et B, des lames de platine dans les vases A′ et B′, et l'on met deux de ces métaux en communication avec les électrodes d'un électromètre à quadrants.

Voici les résultats obtenus avec différentes combinaisons. En désignant par A et B les deux liquides, on a indiqué dans la dernière colonne les tensions relatives à chaque expérience.

(1) *Annales scientifiques de l'École normale*, 2e série, t. II, p. 227.

NUMÉROS DES EXPÉRIENCES	VASES EMPLOYÉS	DÉVIATION DE L'ÉLECTROMÈTRE	SOMME DES TENSIONS
I	A et A′	218,75	$Zn\|A+A\|Pt+Pt\|Zn$
II	A B′	269,5	$Zn\|A+A\|B+B\|Pt+Pt\|Zn$
III	B A′	208,25	$Zn\|B+B\|A+A\|Pt+Pt\|Zn$
IV	B B′	257,5	$Zn\|B+B\|Pt+Pt\|Zn$
V	A′ B′	50,6	$Pt\|A+A\|B+B\|Pt$

Le résultat de la dernière expérience peut être calculé à l'aide des précédentes combinées deux à deux; l'excès de la seconde sur la première, et celui de la quatrième sur la troisième correspondent à la même somme de tensions. On trouve, en effet,

$$(II) - (I) = 269,5 - 218,75 = 50,75,$$
$$(IV) - (III) = 257,5 - 208,25 = 49,25,$$

valeurs identiques à celle qui a été obtenue dans la cinquième expérience. Il y avait encore une combinaison, celle des vases A et B, laquelle donnerait pour somme de tensions

$$Zn|A+A|B+B|Zn,$$

et dont on peut calculer le résultat de deux manières, par les nombres du tableau. On a, en effet,

$$(I) - (III) = 218,75 - 208,25 = 10,5,$$
$$(II) - (IV) = 269,5 - 257,5 = 12.$$

Cette dernière vérification est satisfaisante, vu la petitesse des déviations.

Dans tous les cas, le liquide du vase extérieur n'intervient pas; on peut donc considérer ces expériences comme démontrant, non pas que la loi de Volta est applicable aux liquides, mais qu'elle n'est pas vraie pour les contacts des liquides avec les métaux.

908. **Deux liquides et deux métaux.** — Cette forme de couple est l'une des plus employées parce qu'elle donne une force électromotrice qui varie très peu. Les deux liquides peuvent être mis directement en contact l'un au-dessus de l'autre, mais le plus

souvent on les sépare soit par une membrane, soit par un vase en terre poreuse; le contact des liquides est ainsi assuré sans qu'ils puissent se mélanger. Tel est, par exemple, le couple de Daniell (fig. 251), formé par une lame de cuivre C plongeant dans une dissolution de sulfate de cuivre, et d'une dissolution de sulfate de zinc dans laquelle plonge une lame de zinc Z. La force électromotrice a pour expression

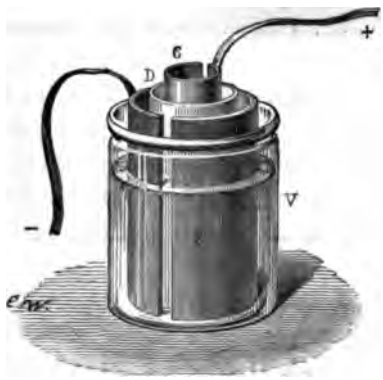


Fig. 251

$$E = Cu\,|\,CuO.SO^3 + CuO.SO^3\,|\,ZnO.SO^3 + ZnO.SO^3\,|\,Zn + Zn\,|\,Cu.$$

On dit habituellement, dans ce cas, que le cuivre forme le pôle positif du couple, c'est-à-dire l'extrémité qui est au potentiel le plus élevé ; cela est exact si l'on sous-entend que le zinc qui forme l'autre pôle sera terminé aussi par un bout de cuivre.

Fig. 252.

Pour constituer une pile, il suffit de réunir un certain nombres de couples bout à bout en faisant communiquer le cuivre de chacun d'eux avec le zinc du suivant, en ayant soin que les métaux se succèdent toujours dans le même ordre d'une extrémité à l'autre (fig. 252).

On a imaginé un très-grand nombre de couples électriques,

de nature et de formes très-variées ; nous n'insisterons pas sur la description de ces différents appareils.

909. **Comparaison des forces électromotrices.** — On peut comparer les forces électromotrices de deux manières : en déterminant les tensions de tous les contacts qui interviennent dans la constitution du couple, ou en mesurant la différence de potentiel des métaux, supposés identiques, qui forment les deux extrémités ou les *pôles* du couple.

La force électromotrice joue un rôle important dans l'étude des courants électriques et on peut alors l'envisager sous un point de vue différent, mais sa détermination se ramène presque toujours à une question d'électricité statique et de différence de potentiel. Il en est ainsi, en particulier, quand on compare les forces électromotrices par la méthode dite *d'opposition*. Le principe de cette méthode consiste à constituer un circuit fermé, comprenant le couple que l'on veut étudier, et dans lequel on introduit en sens contraire une autre force électromotrice connue, que l'on fait varier de telle façon que le courant soit nul ; dans ce cas, la différence de potentiel de deux points d'un même fil faisant partie du circuit est toujours nulle, et les deux forces électromotrices sont égales et de signes contraires. La méthode d'opposition plus ou moins directe et la détermination des différences de potentiel du couple non fermé doivent donc conduire aux mêmes nombres.

M. Kohlrausch (1), par exemple, électrisait un condensateur par le couple à étudier, puis évaluait la charge de l'un des plateaux à l'aide de l'électromètre de Dellmann, ce qui déterminait la différence de potentiel du couple ; il comparait ensuite les résultats ainsi obtenus aux forces électromotrices des mêmes couples mesurées par une méthode d'opposition. Dans le tableau qui suit, les liquides sont disposés dans l'ordre suivant lequel ils seraient parcourus par le courant si le circuit était fermé, de sorte que le dernier métal forme le pôle positif ; les nombres compris entre parenthèses indiquent la densité des liquides. On a représenté par 100 la force électromotrice et la différence de potentiel du couple Daniell.

(1) *Pogg Ann.* T. LXXV, p. 220. — *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XLI, p. 357.

NATURE DU COUPLE	FORCE ÉLECTROMOTRICE	DIFFÉRENCE DE POTENTIEL
I. Zinc — Sulfate de zinc — Acide nitrique (1,357) — Platine. . . .	149	150
II. Zinc — Sulfate de zinc — Acide nitrique (1,213) — Platine. . . .	150	147
III. Zinc — Sulfate de zinc — Acide nitrique (1,213) — Platine. . . .	139	138
IV. Zinc — Sulfate de zinc — Sulfate de cuivre — Cuivre (Daniell). . . .	100	100
V. Argent — Cyannure de potassium — Sel marin — Sulfate de cuivre — Cuivre.	74	75,5
VI. Même couple, au bout de quelque temps.	72	73,8
VII. Même couple, au bout d'un temps plus long.	65,5	65,5

La comparaison des nombres est aussi satisfaisante que le comporte la nature des phénomènes.

910. M. Gerland a fait des expériences analogues en comparant la force électromotrice totale, dans un couple à un seul liquide, à la somme des tensions des trois contacts qui constituent le couple. Il a ainsi obtenu, en représentant par 100 la force électromotrice du couple de Volta :

NATURE DU COUPLE	FORCE ÉLECTROMOTRICE	SOMME DES TENSIONS DE CONTACT
I. Zinc — Eau — Argent.	153,6	153,3
II. Zinc — Eau — Or.	143,1	142,9
III. Zinc — Eau — Platine.	139,6	139,9
IV. Zinc — Eau — Cuivre (Volta). . .	100	100
V. Cuivre — Eau — Argent.	24,2	24,7
VI. Cuivre — Eau — Or.	14,5	14,3
VII. Cuivre — Eau — Platine.	11,8	11,3

Ces résultats paraissent encore bien concordants, mais nous avons vu que la détermination des tensions de contact est très-incertaine ; on peut vérifier, en effet, que les nombres de la der-

nière colonne ne satisfont pas à certaines équations de condition qu'il est facile d'établir.

Ainsi, la première et la quatrième expérience donnent les équations

$$(I)\quad Zn\,|\,Ag + Ag\,|\,Aq + Aq\,|\,Zn = 153{,}3,$$
$$(IV)\quad Zn\,|\,Cu + Cu\,|\,Aq + Aq\,|\,Zn = 100,$$

d'où l'on déduit, par soustraction,

$$Cu\,|\,Ag + Ag\,|\,Aq + Aq\,|\,Cu = 53{,}3.$$

Le premier membre de cette équation représente précisément la force électromotrice du cinquième couple ; comme l'expérience directe a donné seulement 24,7, on voit que la précision des mesures laissait beaucoup à désirer.

911. M. Branly a déterminé les différences de potentiel de plusieurs couples par un électromètre à quadrants, et vérifié que les équations de condition étaient satisfaites.

	NATURE DU COUPLE.	DIFFÉRENCE DE POTENTIEL.	
I	Zinc — Eau acidulée par $\frac{1}{25}$ d'acide sulfurique — Fer	36,12	65,62
	Fer — Eau acidulée — Cuivre.	29,6	
	Zinc — Eau acidulée — Cuivre.	65,4	
II	Zinc — Eau acidulée par $\frac{1}{5}$ d'acide sulfurique — Fer.	55	90
	Fer — Eau acidulée — Cuivre.	35	
	Zinc — Eau acidulée — cuivre.	92	

Les couples sont laissés dans le même état pendant un quart d'heure.

III	Zinc — Acide — Fer.	25	95
	Fer — Acide — Cuivre.	70	
	Zinc — Acide — Cuivre.	94	
IV	Cadmium — Sulfate de cadmium — Sulfate de cuivre — Cuivre.	138,37	205,87
	Zinc amalgamé — Sulfate de zinc — Sulfate de cadmium — Cadmium.	67,5	
	Zinc amalgamé — Sulfate de zinc — Sulfate de cuivre — Cuivre (Daniell).	204,4	

Dans chacune des trois premières séries d'expériences, on reconnaît aisément que la force électromotrice du dernier couple

doit être égale à la somme des forces électromotrices des deux premières, condition qui est suffisamment vérifiée.

Il n'en est pas de même dans la quatrième série. S'il se trouve que la force électromotrice du couple Daniell est égale à la somme des deux autres, cela tient uniquement à ce que la loi de Volta s'applique aux sulfates neutres de protoxydes, ce qui est conforme aux observations de M. Wild (906). En effet, la somme des tensions dans les deux premiers couples est

$$Zn\,|\,Cu + Cu\,|\,CuO.SO^3 + CuO.SO^3\,|\,CdO.SO^3 + CdO.SO^3\,|\,ZnO.SO^3 + ZnO.S^3\,|\,Zn,$$

et l'expérience prouve que l'on a

$$CuO.SO^3\,|\,CdO.SO^3 + CdO.SO^3\,|\,ZnO.SO^3 = CuO.SO^3\,|\,ZnO.SO^3.$$

La vérification constatée par M. Branly dans le cas actuel n'aurait donc pas lieu avec d'autres dissolutions salines ou acides.

Voici encore quelques nombres déterminés par M. Branly, sur des couples à un liquide, qui comportent des vérifications analogues. Le couple Daniell à sulfates a été pris égal à 100.

MÉTAUX	RICHESSE DU LIQUIDE EN ACIDE SULFURIQUE				
	0,02	0,03	0,04	0,10	0,20
Zinc — Platine. . . .	137,9	133,9	133,8	131	131,4
Zinc — Argent	110,8	112,3	111,7	108,8	107
Argent — Platine. . .	27,5	26,4	23,3	25,5	24,8
Zinc — Cuivre. . . .	91,1	»	87	87,2	»
Aluminium — Platine.	104,3	105,9	103,7	102,8	95,8
Fer — Platine. . . .	91,1	89,1	88,3	83,3	79

912. **Couple à gaz.** — M. Grove [1] découvrit que l'aiguille d'un galvanomètre se trouvait déviée d'une manière permanente quand on le faisait communiquer avec deux petites lames de platine recouvertes par des tubes renfermant de l'oxygène et de l'hydrogène. Il y avait donc là une force électromotrice nouvelle

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. VIII, p. 246 et t. XI, p. 228.

où les gaz jouaient un rôle important; le passage du courant était d'ailleurs accompagné par la disparition progressive de l'hydrogène et de l'oxygène et la formation d'une certaine quantité d'eau. M. Grove profita de cette observation pour construire un couple qu'il appela *couple à gaz*, et auquel il donna la forme suivante. Les gaz sont renfermés dans des tubes T (fig. 253), qui contiennent une lame de platine platiné reliée par un fil avec un godet métallique E, où l'on met une goutte de mercure. Deux tubes semblables O et H sont montés dans les tubulures latérales d'un flacon V à trois tubulures. Ce flacon étant complétement rempli d'eau acidulée, on fait passer dans les cloches de l'hydrogène et de l'oxygène, de façon que les lames de platine continuent de toucher le liquide. Dans ces conditions, le godet P, correspondant à l'oxygène, forme le pôle positif, et le godet N le pôle négatif; si le circuit extérieur est fermé, les gaz disparaissent peu à peu dans les proportions convenables pour former de l'eau.

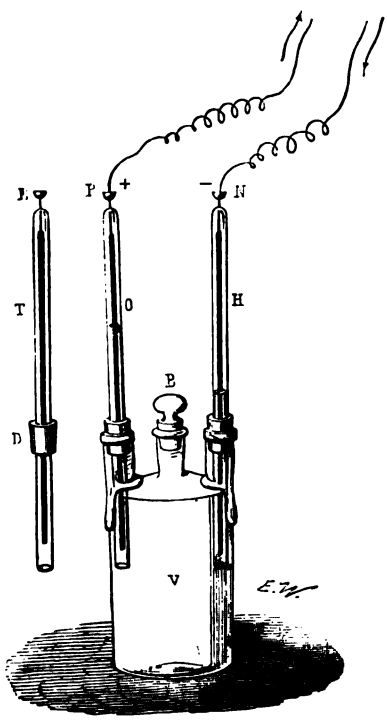


Fig. 253.

Le moyen le plus commode d'obtenir des gaz dans les deux cloches est d'employer une pile étrangère que l'on met en communication avec les deux pôles P et N, de manière à décomposer l'eau du flacon. On pourrait alors attribuer l'action du couple à gaz à la petite quantité d'ozone qui se forme toujours dans la décomposition de l'eau, mais l'expérience démontre que les résultats sont absolument indépendants de la manière dont les gaz ont été préparés.

M. Grove a formé ainsi une pile (fig. 254) en réunissant une série de flacons semblables par leurs pôles de noms contraires. Un seul couple suffisait pour décomposer l'iodure de potassium, deux couples donnaient déjà une décomposition sensible de l'eau acidulée; avec 50 couples, on éprouvait une commotion en touchant les deux pôles, et M. Grove obtint des étincelles brillantes entre des cônes de charbon. Quand on emploie cette pile pour décomposer l'eau, on observe qu'il disparaît dans chacun

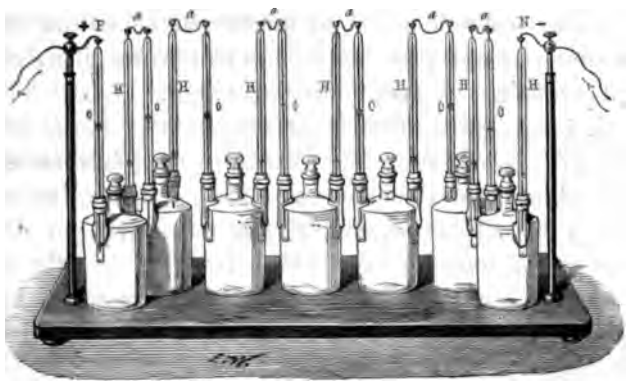


Fig. 254.

des couples une quantité de gaz sensiblement égale à celle qui se dégage dans le voltamètre. C'est là une propriété importante, dont on trouve l'analogue dans toutes les piles électriques.

L'origine de la force électromotrice est ici plus difficile à préciser. Les lames de platine prennent des états physiques différents par suite des gaz dont elles se sont imprégnées, et, en marquant par des indices convenables le platine ainsi modifié, on rencontre dans le couple les contacts suivants :

$$Pt \mid Pt_o + Pt_o \mid Aq + Aq \mid Pt_h + Pt_h \mid Pt = E.$$

Ces expériences prouvent en définitive que le contact des gaz donne lieu à des tensions qui ne suivent pas la loi de Volta.

913. **Polarisation des électrodes.** — La pile à gaz de Grove peut être considérée comme une application d'un phénomène connu depuis longtemps sous le nom de *polarisation des élec-*

trodes, et qui avait déjà été utilisé pour la construction de piles dites *secondaires*.

Gautherot, en 1801 [1], fit l'observation curieuse que deux fils de platine ou d'argent, ayant servi à décomposer de l'eau, jouissent de propriétés électriques particulières. Il plongea deux fils pareils dans de l'eau salée en faisant communiquer les extrémités avec les pôles d'une pile ; puis, quand l'eau fut en pleine décomposition, il détacha les bouts qui touchaient la pile et, les appliquant sur la langue, il éprouva pendant quelques instants la même saveur brûlante que si ces fils eussent été encore en communication avec une pile. Ces mêmes extrémités plongées dans l'eau provoquaient une petite décomposition.

Peu de temps après, Ritter [2] profita de cette polarité produite par une pile galvanique pour construire un électromoteur ne renfermant qu'un seul métal et un liquide. Il forma une colonne de disques métalliques séparés les uns des autres par des rondelles de carton humide, et mit les extrémités de cette colonne en communication avec les pôles d'une pile de Volta. Au bout d'un temps plus ou moins long, suivant le nombre des rondelles, il supprima les communications, et reconnut que la colonne jouissait maintenant de toutes les propriétés de la pile électrique. Elle pouvait servir à charger un condensateur, provoquer des secousses électriques, décomposer l'eau, etc., mais avec une énergie rapidement décroissante. Les pôles de cette pile secondaire étaient de mêmes signes que ceux de la pile qui l'avait excitée, de sorte que, si l'on fermait le circuit par un conducteur, le flux d'électricité entre les rondelles et les disques de métal était de sens contraire à celui qu'avait provoqué la pile principale. Ritter considérait son appareil comme un condensateur d'électricité galvanique, ce qui n'est pas tout à fait inexact.

Si la pile secondaire est formée avec de l'eau pure et un métal non oxydable, comme le platine, les deux faces de chaque disque se couvrent de couches de gaz (hydrogène et oxygène) qui proviennent de la décomposition de l'eau, et se trouvent ainsi dans le même état que les lames de la pile de Grove.

Il en est de même dans l'expérience suivante de M. Matteucci.

[1] *Histoire du Galvanisme*, par Sue, t. II, p. 210.
[2] *Journal de Physique*, de Desmazures, t. LVII, p. 345 (1803).

Deux lames de platine, communiquant entre elles par le fil d'un galvanomètre, sont placées dans des cloches qui renferment l'une de l'hydrogène, l'autre de l'oxygène, puis plongées dans l'eau : l'aiguille est fortement déviée. La moindre différence dans l'état physique des métaux suffit pour produire un effet analogue. Si des lames de platine parfaitement propres sont plongées en même temps dans l'eau, elles ne produisent pas de courant; mais il suffit de les introduire l'une après l'autre pour que la différence de leurs états physiques provoque une déviation momentanée du galvanomètre (M. Becquerel).

914. La force électromotrice due à la polarisation du platine par les gaz n'est pas une quantité constante. Quand deux lames pareilles communiquent avec les pôles d'une pile faible, la force électromotrice de polarisation, nulle au début, croît d'une manière continue, d'abord proportionnellement à la quantité d'électricité qui s'écoule, comme l'a montré M. Becquerel [1], puis d'une manière plus lente jusqu'au moment où les gaz se dégagent en abondance [2]. Cette force électromotrice est naturellement de signe contraire à celle de la pile, de sorte que la décomposition s'arrêtera à un certain point si la force électromotrice de la pile n'est pas supérieure au maximum de polarisation des électrodes. De même, quand il se produit un dégagement de gaz dans la pile, comme cela a lieu pour les couples de Volta, il s'y développe aussi une polarisation; si, après avoir fermé la pile pendant quelque temps, on isole les pôles de nouveau, la différence de potentiel des extrémités se trouve diminuée de toutes les forces électromotrices de polarisation.

Enfin M. Gaugain [3] a montré aussi que, dans la pile à gaz de Grove, l'oxygène que contient l'une des cloches ne sert qu'à dépolariser l'électrode enfermée dans cette cloche. Quand on se borne à considérer le couple à l'état de repos, on peut remplacer l'oxygène par de l'acide carbonique ou par de l'eau privée de gaz sans que la force électromotrice soit modifiée. Il suffit même que la lame de platine de l'autre cloche soit plongée dans de l'eau contenant de l'hydrogène en dissolution.

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXII, p. 381 (1846).
[2] Gaugain, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XLI, p. 1164 (1855).
[3] *Ibidem*, t. LXIV, p. 364 (1867).

915. Les gaz ne sont évidemment pas les seuls corps capables de produire la polarisation des électrodes. Ainsi, quand deux lames de platine communiquant avec un galvanomètre sont humectées, l'une par un acide et l'autre par une base, puis plongées dans l'eau, elles produisent un courant intense de faible durée. Si donc deux lames de platine se trouvaient entourées de couches semblables par suite de l'action d'une pile électrique, elles donneraient lieu à une polarisation des électrodes dont il faudrait tenir compte. Cette question a donné lieu à un grand nombre de travaux sur lesquels nous ne pouvons pas insister; nous nous bornerons à citer le parti que M. Planté (1) a su tirer de la polarisation de lames de plomb pour construire des piles secondaires d'une très-grande intensité.

La polarisation des électrodes est la cause la plus importante d'affaiblissement des piles électriques. Dans les couples de Volta, le cuivre se couvre, quand la pile est fermée, d'une couche d'hydrogène qui donne une force électromotrice de sens contraire et une résistance considérable. L'avantage des piles à deux liquides consiste surtout dans la suppression de ces couches de gaz. Dans le couple de Daniell à sulfates (908) il n'y a pas de polarisation sensible. Quand l'appareil fonctionne, le cuivre se recouvre d'une couche de cuivre, le zinc se dissout; la proportion du sulfate de zinc augmente et celle du sulfate de cuivre diminue, mais la résistance du couple ne change pas d'une manière appréciable, tant qu'il y a du sulfate de cuivre, et les contacts successifs ne sont pas modifiés. La force électromotrice reste donc sensiblement invariable.

Un autre problème à résoudre est de former les pôles d'une pile par des substances qui ne donnent lieu à aucune polarisation quand on les emploie pour faire passer le courant dans des corps étrangers. On peut alors, comme l'a fait M. Du Bois-Reymond dans ses expériences d'électro-physiologie, terminer les pôles par des tiges de zinc communiquant avec des corps humides, tels que du papier ou des morceaux d'argile, imprégnés de sulfate de zinc. Ces deux solutions de sulfate de zinc formeront des *électrodes non polarisables*.

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XV, p. 5.

PHÉNOMÈNES ÉLECTROSTATIQUES DANS LES PILES.

916. **Construction des piles électriques.** — Dans la pile de Volta, qui est formée de doubles lames de cuivre et de zinc, séparées les unes des autres par des rondelles de drap ou de papier humide, nous savons qu'un couple complet doit être considéré comme terminé par des métaux identiques (901), chacune des lames de zinc, par exemple, servant de pôle négatif à l'un des couples et de pôle positif au couple suivant.

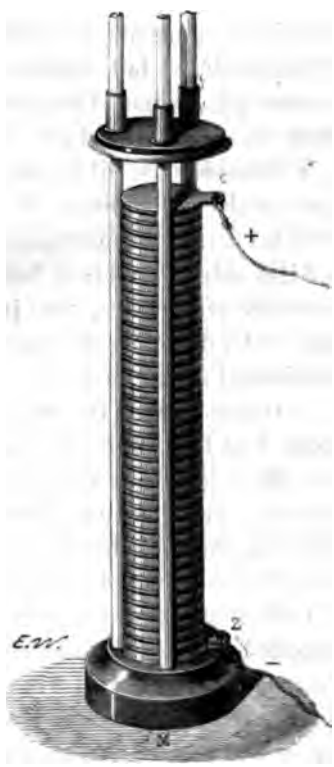


Fig. 255.

Avec cette disposition, l'extrémité supérieure, qui est au potentiel le plus élevé et forme le pôle positif, se termine par une lame de zinc. Dans l'hypothèse ou l'électricité serait produite par les seules actions chimiques, les deux métaux extrêmes seraient inutiles. Habituellement, en effet, on met à la partie inférieure un seul disque de zinc (fig. 255), puis des lames doubles dans tout l'intervalle et une seule lame de cuivre sur le dernier drap. Le zinc se trouve alors former le pôle négatif; mais, quelque usage que l'on fasse de la pile, on introduit nécessairement un nouveau contact extérieur et les deux dispositions sont équivalentes.

La pile en colonne est peu employée : si les rondelles de drap ne contiennent qu'une quantité de liquide très-faible, l'appareil est trop peu conducteur; si la quantité de liquide est plus

grande, les rondelles inférieures sont écrasées par le poids de la colonne et laissent suinter du liquide qui s'écoule le long de la surface. Nous prendrons cependant comme type la pile à colonne, parce que sa forme est très-régulière, mais les résultats auxquels nous arriverons sont immédiatement applicables à toutes les autres piles.

917. **Théorie de Biot.** — Biot a donné [1] une théorie très-étendue de l'appareil électromoteur de Volta, quoique tous ses raisonnements reposent sur une équivoque permanente dans l'emploi d'une quantité mal définie. Biot admet que la production d'électricité se fait seulement au contact du zinc et du cuivre, erreur qui n'a pas d'importance, mais il entend le phénomène dans un sens qui n'est pas conforme au principe de Volta.

« Considérons, dit-il, une seule pièce formée d'une plaque de zinc soudée à une plaque de cuivre de dimensions égales, et mettons le cuivre en communication avec le sol. Cette face sera alors à l'état naturel; mais la face zinc se couvrira d'une *couche d'électricité vitrée libre*, dont je représenterai par α la *quantité totale*. Cet α dépendra de l'étendue des deux plaques et sera proportionnel à leur surface.

« On pose sur la face zinc une rondelle de drap imbibée d'eau salée dont l'action électromotrice est insensible. Alors l'électricité *libre* de la face zinc se répandra sur la surface de ce conducteur ; mais, comme il faut toujours que le zinc possède l'*excès* d'électricité vitrée que son contact avec le cuivre exige, il le reprendra au cuivre et celui-ci au sol. »

Cette quantité α, qui intervient dans tous les calculs et que Biot appelle l'*excès d'électricité dû au contact*, n'a pas de signification déterminée; c'est tantôt une quantité d'électricité, tantôt une densité électrique ou une tension mal définie, ce qui enlève toute valeur à la théorie. Néanmoins, comme les questions à résoudre y sont énoncées clairement, nous allons l'exposer en peu de mots.

I. *Pile non isolée.* — Considérons d'abord le cas d'une pile communiquant par l'une de ses extrémités avec le sol.

Un premier couple étant constitué comme précédemment, on prend une nouvelle pièce cuivre et zinc pareille à la première;

[1] *Traité de Physique exp. et mathématique*, t. II, p. 478.

après avoir touché sa face cuivre, on l'isole, puis on la pose sur la rondelle humide. Alors il s'opère deux actions : « 1° La face zinc de cette seconde pièce conserve l'excès d'électricité vitrée $+\alpha$ qu'elle tient de son contact avec le cuivre ; 2° le système entier de la pièce partage l'électricité libre de la rondelle, comme le ferait tout autre conducteur. La rondelle reprend cette électricité au zinc inférieur, celui-ci au cuivre, et le cuivre au sol ; de sorte qu'après un temps qui doit être infiniment petit, si la conductibilité est parfaite, il s'établit un état électrique stable. » Les quantités d'électricité *libres* sont :

Pièce supérieure	Face zinc	$+2\alpha$,
	Face cuivre communiquant à la rondelle humide	$+\alpha$;
Pièce inférieure	Face zinc	$+\alpha$,
	Face cuivre communiquant avec le sol	0.

En continuant ainsi, on voit que, pour n couples de zinc et de cuivre, les électricités libres des différents éléments seront :

n^e couple	Zinc	$+n\alpha$,
	Cuivre	$+(n-1)\alpha$;
⋮	⋮	
2e couple	Zinc	$+2\alpha$,
	Cuivre	$+\alpha$;
1er couple	Zinc	$+\alpha$,
	Cuivre	0.

La somme des électricités libres est donc, en supposant les rondelles de drap assez minces pour qu'on puisse négliger l'électricité libre qu'elles possèdent,

$$\text{Sur les zincs} \quad \alpha + 2\alpha + \ldots\ldots + n\alpha = \frac{n(n+1)}{1.2}\alpha ;$$

$$\text{Sur les cuivres} \quad 0 + \alpha + \ldots + (n-1)\alpha = \frac{(n-1)n}{1.2}\alpha .$$

La somme totale est

$$\frac{n(n+1)}{2}\alpha + \frac{(n-1)n}{2}\alpha = n^2\alpha .$$

Cette somme représenterait la quantité d'électricité qui s'écoule quand on met le pôle supérieur en communication avec le sol ; ce serait donc la mesure de la décharge électrique.

Pour évaluer les tensions, on emploiera la méthode suivante. Prenons un condensateur dont la force condensante est F ; cette force est le rapport des charges M et m que prend le collecteur avec ou sans condenseur, m étant d'ailleurs la charge *libre* du collecteur pendant la condensation. Si le collecteur seul communique avec la pile, il prendra une charge E proportionnelle à la charge libre e de la pile au point de communication; on peut écrire

$$\frac{E}{e} = i, \quad E = ei.$$

Le rapport i dépend des dimensions relatives du collecteur et des disques de la pile.

Quand le condenseur intervient, le point touché de la pile reprend toujours la même charge e, et l'électricité libre du collecteur est alors égale à la charge primitive E ; on a

$$E = ei = m,$$

et la charge totale est

$$M = Fm = eFi. \tag{1}$$

Si l'on a touché la dernière lame de zinc, dont la charge libre est $n\alpha$, par l'intermédiaire d'une rondelle humide pour éviter un nouveau contact métallique, on voit que la charge N_0 du collecteur est

$$N_0 = n\alpha Fi, \tag{2}$$

la quantité totale d'électricité libre de la pile étant toujours

$$Q_0 = n^2\alpha. \tag{3}$$

II. *Pile isolée.* — Supposons qu'on ait monté la pile en maintenant toutes les pièces parfaitement isolées ; la charge totale d'électricité libre devra toujours être nulle.

Avec un seul couple, les charges seront :

Sur le zinc. . . . . $+\frac{\alpha}{2}$,

Sur le cuivre. . . . . $-\frac{\alpha}{2}$.

Si la pile est composée d'un nombre n de couples, on obtiendra la distribution des électricités en écrivant que la charge totale est nulle et que la différence des charges de deux métaux voisins est constante.

L'électricité libre du dernier zinc étant égale à x, l'électricité libre des lames suivantes sera successivement $x-\alpha$, $x-\alpha$, $x-2\alpha$, $x-2\alpha$, $x-3\alpha$,..., et la quantité totale d'électricité libre $2nx-n^2\alpha$. On a donc

$$2nx=n^2\alpha,$$

ou

$$x=n\frac{\alpha}{2};$$

l'électricité libre du cuivre inférieur sera, de même,

$$x-n\alpha=-n\frac{\alpha}{2}.$$

En réalité, il est impossible que toutes les pièces restent isolées pendant l'opération ; mais il suffit d'isoler la pile, une fois montée, pour que les déperditions inévitables l'amènent rapidement dans l'état régulier qu'elle devrait avoir.

Si l'on met le condensateur en communication avec le pôle supérieur de la pile et qu'on désigne par y l'électricité libre qui restera sur ce dernier élément, la charge du collecteur sera

$$N_1=yFi.$$

L'électricité libre des lames suivantes étant successivement $y-\alpha$, $y-\alpha$, $y-2\alpha$,..., la quantité d'électricité libre sur la pile est

$$Q_1=2ny-n^2\alpha.$$

Comme la charge totale de la pile et du collecteur doit être nulle, il en résulte

$$y(Fi+2n)-n^2\alpha=0,$$

$$(4)\qquad y=\frac{n^2\alpha}{Fi+2n}.$$

On en déduit

$$(5)\quad N_1=Fi\frac{n^2\alpha}{Fi+2n}=n\alpha Fi\frac{n}{Fi+2n}=N_0\frac{n}{Fi+2n}.$$

La charge du condensateur est ainsi beaucoup plus faible que si la pile n'eut pas été isolée, ce que l'expérience confirme.

Si l'on fait, par exemple,

$i = 1$, ce qui suppose les disques égaux au collecteur

$F = 120$, et $n = 30$,

il vient

$$N_1 = \frac{N_0}{6}.$$

On peut se proposer de déterminer quel est alors sur la pile le point *neutre*, celui dont l'électricité libre est nulle. L'électricité libre de la p^e lame de zinc étant égale à $y - (n - p)\,\alpha$, le rang p_1 de la lame neutre est donné par la condition

$$y - (n - p_1)\,\alpha = 0,$$

d'où l'on tire, en tenant compte de l'équation (4),

$$p_1 = n - \frac{y}{\alpha} = n\frac{n + Fi}{2n + Fi}. \qquad (6)$$

III. *Pile communiquant d'abord avec le sol, puis isolée.* — Considérons enfin le cas où la pile, d'abord en communication avec le sol par son pôle inférieur, est ensuite isolée, puis reliée au condensateur par son pôle supérieur. En désignant par y l'électricité libre du dernier zinc, N_2 la charge du condensateur, Q_2 l'électricité libre de la pile, on a encore

$$N_2 = yFi,$$
$$Q_2 = 2ny - n^2\alpha.$$

Mais ici la charge totale n'est plus nulle; elle est égale à la charge primitive de la pile d'abord non isolée, ce qui donne

$$N_2 + Q_2 = n^2\alpha,$$
$$y(Fi + 2n) - n^2\alpha = n^2\alpha,$$
$$y = \frac{2n^2\alpha}{2n + Fi},$$
$$N_2 = 2Fi\,\frac{n^2\alpha}{Fi + 2n} = 2N_1. \qquad (7)$$

La charge du condensateur est alors double de celle qu'il recevrait de la pile isolée.

Le rang p_1 de l'élément neutre est

$$p_1 = n - \frac{y}{\alpha} = n\frac{Fi}{2n + Fi}. \qquad (8)$$

La même méthode permettrait de déterminer l'état de l'appareil pour le cas où l'on aurait mis en communication avec le condensateur un autre élément que le dernier.

Il est inutile de discuter en détail les raisonnements de Biot, parce que la signification de l'excès d'électricité α est trop élastique; mais il n'est pas sans intérêt de comparer les résultats de cette théorie avec ceux que l'on peut calculer en s'appuyant sur des principes plus rigoureux.

918. **Théorie basée sur les différences de potentiel.** — Dans une pile formée de n couples identiques, dont chacun a une force électromotrice égale à E, la différence de potentiel des pôles est égale à nE. Cette différence, étant liée à la succession des contacts, ne dépend en rien de l'état dans lequel on mettra la pile, qu'elle soit isolée ou non, ou bien qu'après l'avoir isolée on la mette en communication avec un conducteur électrisé de forme quelconque. Si donc, à l'état électrique qu'établissent les contacts sur une pile isolée, on superpose une couche électrique distribuée comme elle le serait sur un conducteur homogène ayant exactement la forme de la pile, l'appareil sera encore en équilibre. En effet, cette couche nouvelle ajoute en tous les points un potentiel constant, de sorte que les différences qui existaient primitivement ne sont pas modifiées, et la loi des contacts est encore satisfaite.

Il résulte de là que, si la pile est mise en communication avec un conducteur étranger, elle se comporte comme une surface métallique ayant la même forme, et possède la même capacité électrique; cette remarque simplifiera beaucoup la question.

1. *Pile non isolée.* — Quand la pile n'est pas isolée, le pôle inférieur négatif communiquant avec le sol, le potentiel du pôle supérieur est, s'il y a $(n+1)$ lames de cuivre, c'est-à-dire n couples, égal à nE, et le potentiel de la $(p+1)^e$ lame de cuivre est pE. Lorsqu'on met cette lame en communication par un fil avec un

conducteur quelconque, un condensateur, par exemple, dont la capacité électrique est C, la charge de ce condensateur est

$$P_0 = pEC,$$

puisque la communication avec le sol maintient un potentiel nul sur le pôle négatif de la pile.

La charge que prend le condensateur en touchant le sommet de la pile est donc

$$N_0 = nEC. \qquad (2)'$$

II. *Pile isolée.* — Si la pile a été isolée pendant un temps assez long pour qu'elle ait pris un état d'équilibre définitif et symétrique, le potentiel est égal à $+\frac{n}{2}E$ au pôle positif, à zéro au milieu de la pile, et à $-\frac{n}{2}E$ au pôle négatif.

Mettons maintenant le pôle positif en communication avec le condensateur. Si le potentiel de la lame touchée est alors devenu égal à y, la charge du condensateur est

$$N_1 = Cy.$$

Désignons par K la capacité électrique de la pile. La quantité d'électricité perdue par cet appareil est égale à N_1; par suite, la diminution du potentiel en chaque point est égale à $\frac{N_1}{K}$. Le potentiel primitif de la lame considérée étant égal à $\frac{n}{2}E$, on a donc

$$y = \frac{n}{2}E - \frac{N_1}{K},$$

et, par suite,

$$N_1 = C\left(\frac{n}{2}E - \frac{N_1}{K}\right).$$

On en déduit :

$$N_1 = \frac{\frac{n}{2}E}{\frac{1}{C} + \frac{1}{K}}. \qquad (5)'$$

Le rang $(p_1 + 1)$ de l'élément *neutre*, c'est-à-dire au potentiel zéro, est déterminé par l'équation

$$\left(p_1 - \frac{n}{2}\right) E = \frac{N_1}{K} = \frac{n}{2}\frac{EC}{C+K},$$

qui donne

$$(6)' \qquad p_1 = \frac{n}{2}\cdot\frac{2C+K}{C+K}.$$

Si l'on avait touché le milieu de la pile, la charge du collecteur eût été nulle, ce qui est évident *a priori*.

III. *Pile communiquant avec le sol, puis isolée.* — Supposons enfin que la pile, d'abord en relation avec le sol, soit isolée, puis mise en communication avec le condensateur.

Le collecteur prend une charge N_2, qui produit sur la pile une diminution générale du potentiel égale à $\frac{N_2}{K}$. Le potentiel du pôle touché est alors

$$nE - \frac{N_2}{K},$$

et la charge du condensateur est donnée par l'équation

$$N_2 = C\left(nE - \frac{N_2}{K}\right),$$

d'où l'on déduit

$$(7)' \qquad N_2 = n\frac{E}{\frac{1}{C}+\frac{1}{K}} = 2N_1,$$

relation identique à celle de Biot (7).

On obtiendra le rang $(p_2 + 1)$ de la lame devenue neutre par l'équation

$$p_2 E = \frac{N_2}{K} = nE\,\frac{C}{C+K},$$

ou

$$(8)' \qquad p_2 = n\frac{C}{C+K}.$$

On traitera de la même manière les cas où le conducteur extérieur communiquerait avec un élément quelconque.

Nous avons supposé que les expériences duraient assez longtemps pour que l'équilibre fût atteint, ce qui, en réalité, s'effectue en un temps très-court. Quant à la décharge de la pile, savoir la quantité d'électricité qui s'écoule chaque fois qu'on réunit les deux pôles par un conducteur, elle n'est pas définie d'une manière aussi simple que le croyait Biot. Si les deux pôles sont réunis, il se produit un écoulement continu d'électricité d'un pôle à l'autre, un *courant* électrique dont l'intensité dépend, non-seulement de la nature des contacts, mais de la résistance du circuit. C'est là un problème d'une toute autre nature.

Il est remarquable qu'un calcul exact conduise à des formules si semblables à celles que Biot a déduites de considérations très-différentes. Néanmoins la ressemblance n'est qu'apparente, et l'on peut s'assurer, par la comparaison des formules correspondantes dans les deux théories, que les résultats sont en réalité incompatibles, et qu'on ne peut pas les identifier en remplaçant le rapport $\frac{Fi}{n}$, qui entre dans les expressions de Biot, par une valeur constante en fonction des capacités électriques K et C de la pile et du condensateur.

919. **Vérifications expérimentales. — Pile non isolée.** — On trouve dans la physique de Biot des expériences intéressantes pour le cas seulement où la pile est maintenue en communication avec le sol par l'un de ses pôles. La pile étant posée sur un support métallique, on la mettait en communication avec le collecteur d'un condensateur à l'aide d'un fil de métal plongeant dans une soucoupe de fer posée sur le pôle supérieur de la pile et renfermant du mercure. Le condenseur était touché avec la main un instant, puis on supprimait toutes les communications, on enlevait le collecteur et on le touchait avec un plan d'épreuve que l'on portait dans la balance de Colomb à la place de boule fixe. La boule mobile de la balance étant chaque fois ramenée à l'état neutre, on observait la distance δ à laquelle le plan d'épreuve la maintenait en équilibre ; la charge de ce plan d'épreuve était alors exprimée par la formule

$$K\sqrt{\delta \sin\frac{\delta}{2} tg\frac{\delta}{2}}.$$

Biot a constaté d'abord qu'un contact d'une durée inappréciable suffit pour donner au condensateur sa charge maximum; il a ensuite cherché quelle était l'influence de la nature du liquide et des dimensions des éléments.

Avec 20 couples de cuivre et de zinc, séparés par des rondelles humectées d'eau pure ou de sulfate d'alumine, il a obtenu les déviations suivantes, qui sont exprimées en grades,

Eau pure	81^g, 82, 81, 83, 83	moyenne = 82^g;
Sulfate d'alumine. . .	80^g, 83, 83, 85, 80, 82	moyenne = 82^g,5.

Ces moyennes sont identiques, mais d'autres liquides ont donné des résultats différents :

Potasse.	61,5;
Sulfate de fer.	82,5.

Ces expériences prouvent, conformément à l'opinion de Volta, que la nature du liquide peut avoir une grande influence.

Biot a comparé ensuite une pile de 20 éléments ordinaires avec une autre pile renfermant les mêmes métaux, mais dont les rondelles humides, formées de morceaux de papier vernis et collés sur une partie des surfaces métalliques, avaient une étendue neuf fois plus faible, et il a obtenu

Pour les couples ordinaires.	80,5;
Pour les couples à petites rondelles.	85.

Le rapport des deux déviations est 1,06; elles sont donc égales à $\frac{1}{16}$ près, quantité dont il est difficile de répondre.

Il en a été de même pour les piles suivantes, formées chacune de 16 couples montés au sulfate d'alumine, et dans lesquels les surfaces des lames étaient entre elles comme 1 pour la première, 3,1 pour la seconde et 153,2 pour la troisième. Les moyennes des déviations ont été

Pour la première pile	75^g;
Pour la deuxième pile.	71,6;
Pour la troisième pile.	71,6.

Ces trois valeurs peuvent être considérées comme identiques. Biot attribuait le petit excès de la première à ce que, les disques

étant plus petits, le contact se faisait plus près du bord et pouvait prendre une plus grande charge à cause de la distribution inégale de l'électricité, mais cette interprétation est erronée.

Il résulte des expériences de Biot que la charge du condensateur, quand la pile n'est pas isolée, est indépendante des dimensions des éléments qui constituent la pile et ne dépend que de la nature et du nombre des contacts, ce qui est conforme à la théorie.

920. Péclet (1) a étudié l'influence du nombre des couples. Ce physicien a constaté d'abord que l'on obtient sensiblement la même charge sur un condensateur quand on met le collecteur en communication avec le pôle libre d'une pile non isolée, et le condenseur avec le sol, ou bien quand on réunit séparément le collecteur et le condenseur avec les deux pôles d'une pile isolée. Cela doit être, puisque la différence des potentiels des plateaux est la même dans les deux cas.

Péclet a réuni ensuite à un condensateur à feuilles d'or les extrémités de piles comprenant un nombre variable de couples identiques, formés de lames de fer et de cuivre séparées par des rondelles en peau de chamois; les divergences des feuilles d'or ont été les suivantes :

NOMBRE DE COUPLES n	DIVERGENCE d	$\frac{d}{n}$
1	7°	7
2	15	7,5
3	21	7
4	29	7,25
5	39	7,8
6	50	8,3

Comme il avait vérifié précédemment, à l'aide du condensateur à trois plateaux, que la divergence des pailles était proportionnelle à la charge, il en résulte que la charge du condensateur, ou la différence des potentiels aux deux pôles de la pile, est proportionnelle au nombre des couples.

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série t. II, p. 255.

921. Peltier [1] a fait des mesures plus complètes avec une pile à tasses de Volta, formée de vases en verre renfermant de l'eau et réunis successivement par de doubles lames de zinc et de cuivre soudés. Tous les verres étaient posés sur un gâteau de résine isolant et la surface immergée de chaque lame était seulement de 4 centimètres carrés. Les extrémités de cette pile étaient reliées aux deux plateaux d'un condensateur; on interrompait ensuite les communications, on enlevait le collecteur et on le faisait communiquer avec un électromètre à aiguille aimantée.

Voici le tableau des expériences :

NOMBRE DE COUPLES n	DÉVIATION d	FORCE PROPORTIONNELLE F	$\frac{F}{n^2}$
1	12°	15,6	15,6
2	24,5	61	15,25
3	35	144	16
4	45	253	15,8
5	55,5	395	15,7
6	64	536	14,9
7	73	754	15
8	83	1044	16,3
9	93	1349	16,6
10	103	1594	15,94

Peltier concluait de ces expériences que la tension d'une pile est proportionnelle au carré du nombre des couples; mais il graduait son électromètre (*Notice*, p. 370) en le reliant avec une balance de torsion dont les deux corps répulsifs (aiguille mobile et tige fixe) étaient maintenus en communication par un fil de platine suspendu à l'aiguille et plongeant dans de l'acide sulfurique, et il déterminait la torsion totale nécessaire pour ramener l'aiguille à une distance déterminée. Dans ces conditions, la torsion totale est proportionnelle au carré de la charge.

Les nombres que renferment la troisième colonne, et qui proviennent d'une table de graduation ainsi faite pour l'électromètre, doivent donc être proportionnels au carré de la tension de

[1] *Notice sur la vie et les travaux scientifiques de Peltier*, Paris, 1847.

la pile ou au carré du nombre des couples, comme le montre la dernière colonne.

Une expérience analogue avec des piles sèches a donné les résultats suivants :

NOMBRE DE COUPLES n	DÉVIATION d	FORCE PROPORTIONNELLE F	$\frac{F}{n^2}$
1	0,8	1,6	1,6
2	6,3	6,3	1,57
3	11,5	14,4	1,6
4	15	25	1,56
6	23	56	1,55
8	30	101	1,58
9	33	125,5	1,55
10	37	164,5	1,64
12	43	230	1,60
16	56,3	405	1,58
20	69	643	1,61
24	79	916	1,59

Ces deux tableaux montrent donc, avec un degré d'approximation très-remarquable, que la racine carrée de la force répulsive et, par suite, la tension ou la force électromotrice de la pile, est proportionnelle au nombre des couples.

922. Dans un mémoire de M. Werner Siemens (1), on trouve des expériences intéressantes, qui ont été entreprises dans un but un peu différent, mais qui peuvent être considérées comme une vérification des propriétés de la pile électrique. La méthode de M. Siemens consiste à électriser un condensateur par les deux pôles d'une pile, et à déterminer la quantité d'électricité à l'aide d'un galvanomètre placé, soit sur la communication de la pile avec le condensateur pendant la charge, soit entre les deux armatures pendant la décharge. Si l'isolement des organes est suffisant et les communications établies pendant un temps assez long pour que l'équilibre soit atteint, il est clair que la charge du condensateur doit être égale à la décharge, indépendante de la résistance du circuit, proportionnelle à la force électromotrice de

(1) *Poyg. Annal.*, t. CII, p. 66.

la pile déterminée par une méthode d'opposition, et proportionnelle aussi à la capacité du collecteur; enfin, les résultats ne doivent pas être modifiés quand les deux pôles de la pile sont isolés, ou que l'un d'eux est mis en communication, soit, avec le sol, soit avec un conducteur à un potentiel quelconque.

L'un des condensateurs était formé d'une lame de mica d'un décimètre carré environ et de $\frac{1}{10}$ de millimètre d'épaisseur, couverte de feuilles d'étain sur ses deux faces. Comme chacune des charges ou décharges ne correspond qu'à une quantité d'électricité très-faible, M. Siemens employa une bascule à vibration qui produisait un grand nombre de charges et de décharges successives; il suffisait alors de faire passer ces courants successifs par le galvanomètre pour obtenir une déviation permanente de l'aiguille. Les figures suivantes donneront une idée de la disposition des expériences.

Dans la figure 256, les deux armatures A et B du condensateur

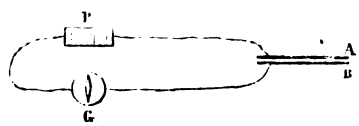


Fig. 256.

sont mises en communication permanente avec les pôles de la pile P par l'intermédiaire du galvanomètre G. Si l'isolement est suffisant, l'aiguille doit rester au zéro.

Dans la figure 257, L est une lame vibrante qui communique avec une des armatures A, et oscille entre deux pointes métal-

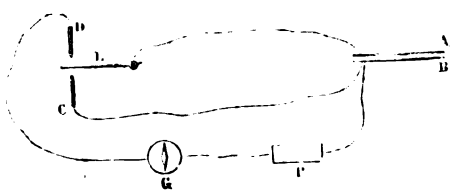


Fig. 257.

liques C et D; ces pointes sont reliées toutes deux à l'armature opposée B, la première directement, la seconde par l'intermédiaire du galvanomètre et de la pile. On voit aisément que les courants de charge seuls agiront sur l'aiguille.

Enfin, avec la disposition de la figure 258, le galvanomètre n'est plus traversé que par les courants de décharge.

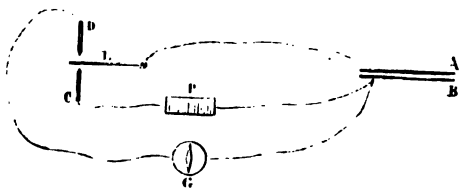


Fig. 258.

La pile était formée avec des couples Daniell montés à neuf tous les deux jours.

Les oscillations de l'interrupteur étant de 60 par seconde, la durée de chaque contact était inférieure à $\frac{1}{120}$ de seconde, mais cet intervalle était assez grand pour établir l'équilibre. La déviation de l'aiguille resta la même quand on fit varier la résistance du fil de 1 à 100.

L'intensité du courant (charge ou décharge) a été proportionnelle à la force électromotrice de la pile, et indépendante de la communication d'une des armatures avec le sol.

Quand on modifiait les dimensions du condensateur, pour une même nature de milieu isolant, l'intensité du courant était toujours proportionnelle à la surface du condensateur et en raison inverse de la distance des armatures. Ces expériences donnent donc un moyen très-simple de comparer les capacités électriques et de vérifier les lois de la condensation. On peut encore employer la même méthode pour déterminer les pouvoirs inducteurs spécifiques de différents milieux. M. Siemens a constaté ainsi que l'air et tous les gaz ont le même pouvoir inducteur spécifique, quelle que soit la pression ; il a obtenu le nombre 0,78 comme pouvoir inducteur de la stéarine et 2,9 pour le soufre. Il suffit de comparer ces résultats à ceux que nous avons indiqués plus haut (381), pour reconnaître l'influence du temps signalée par M. Gaugain (384).

923. Nous citerons aussi quelques nombres déterminés par M. Branly. Une pile à tasses de Volta parfaitement isolée, comme dans les expériences de Peltier, fut réunie avec le sol par un de ses pôles et, par l'autre pôle, avec les deux boules d'une balance de Coulomb à miroir, que l'on ramenait à une distance à

peu près constante par une torsion convenable. Les expériences montrent que la force répulsive des boules à l'unité de distance est proportionnelle au carré du nombre des couples, c'est-à-dire au carré du potentiel du pôle isolé.

NOMBRE DES COUPLES n	TORSION TOTALE DU FIL T	DEMI-DISTANCE ANGULAIRE DES BOULES $\frac{\alpha}{2}$	$\frac{n^2}{T \sin\frac{\alpha}{2} \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}}$
100	535°	7°25′46″	1069
200	2016	7°48′ 8″	1067
250	2988	7°56′14″	1086

Les propriétés de la pile non isolée ont d'ailleurs été vérifiées un grand nombre de fois et appliquées souvent à la graduation des électromètres.

924. **Pile isolée.** — Les mémoires de Peltier renferment une série d'expériences très-remarquables (*Notice*, p. 95), que ce physicien n'a pas interprétées, mais que l'on peut considérer comme une démonstration directe du principe de Volta, d'après lequel la différence des potentiels des métaux extrêmes d'un couple isolé est indépendante de la charge électrique que l'on peut y accumuler.

Un couple de pile sèche, formé d'une feuille de papier couverte de bioxyde de manganèse sur une des faces et d'étain sur l'autre face, était tenu par une mâchoire isolée; les deux faces furent reliées aux deux plateaux d'un électromètre condensateur. Les contacts étant maintenus pendant 10″, parce que l'équilibre n'était pas atteint rapidement à cause de la faible conductibilité du couple, on rompait les communications et, soulevant le plateau supérieur de l'électromètre, on observait la déviation. On ramenait ensuite le plateau supérieur à l'état neutre en le touchant avec le doigt, puis on rétablissait les mêmes communications en laissant au couple et au plateau inférieur leurs charges primitives, et on faisait une nouvelle observation après 10″ de contact. On déchargeait encore le plateau supérieur, puis on rétablissait les communications, et ainsi de suite.

La déviation de l'électromètre allait en croissant à chaque opération, comme on le voit dans le tableau suivant, et parut tendre vers une limite.

NOMBRE DES CHARGES	DÉVIATION	FORCE PROPORTIONNELLE F	$\sqrt{F}$	$\frac{1-\alpha}{1-\alpha^n}\sqrt{F_n}$
1	6°,5	6,5	2,55	2,55
2	12	15,4	3,92	2,16
3	16	28,5	5,33	2,16
4	19,5	41	6,40	2,13
5	22,5	53,75	7,32	2,14
6	25	66,5	8,15	2,16
7	27	79	8,89	2,19
8	28,2	87,4	9,35	2,17
9	29,2	94,6	9,72	2,17
10	30	101	10,05	2,17
11	30,7	106,6	10,32	2,18
12	31,3	111,67	10,56	2,17
13	31,6	114,34	10,70	2,16
∞	«	«	11,42	2,17

Pour calculer ces expériences, nous désignerons par M la quantité d'électricité que le couple primitivement isolé produit, en vertu de sa force électromotrice, sur le plateau inférieur de l'électromètre et le couple lui-même. L'état électrique qui correspond à un contact quelconque peut être établi en supposant que la masse électrique N, qui reste sur le couple et le plateau inférieur, se distribue normalement sur l'appareil tout entier, une fraction αN sur les conducteurs que nous venons d'indiquer, et le reste $(1-\alpha)N$ sur le plateau supérieur. Dans ces conditions, le potentiel serait le même partout ; mais, en superposant à cet état d'équilibre celui qui s'est produit dans la première expérience où toutes les pièces étaient primitivement neutres, nous établirons sur le couple la différence de potentiel qui correspond à la force électromotrice, et la masse totale d'électricité ne sera pas changée. Cette deuxième couche donnant une charge M sur les conducteurs qui sont restés isolés, on voit que la charge totale de ces conducteurs sera égale à

$$\alpha N + M.$$

Cette charge totale sera donc successivement :

Au premier contact. . . . . $M_1 = M$;

Après le 2e contact. . . . . $M_2 = \alpha M_1 + M = M\frac{1-\alpha^2}{1-\alpha}$;

Après le 3e contact. . . . . $M_3 = \alpha M_2 + M = M\frac{1-\alpha^3}{1-\alpha}$;

⋮

Après le n^e contact. . . . . $M_n = \alpha M_{n-1} + M = M\frac{1-\alpha^n}{1-\alpha}$.

Comme la charge est proportionnelle à la racine carrée de la force répulsive des boules de l'électromètre, on aura

$$\frac{M_n}{M_1} = \frac{\sqrt{F_n}}{\sqrt{F_1}} = \frac{1-\alpha^n}{1-\alpha},$$

ce qui donne

$$\sqrt{F_1} = \frac{1-\alpha}{1-\alpha^n}\sqrt{F_n}.$$

Le second membre de cette équation doit être constant.

Les nombres renfermés dans la dernière colonne du tableau qui précède ont été calculés en prenant pour α la valeur 0,81. On voit que l'accord de l'expérience avec la théorie est tout à fait satisfaisant. La seule différence notable correspond à la première observation, mais la déviation est alors très-faible et Peltier avait reconnu lui-même que les petites déviations d'un électromètre donnent toujours des résultats moins réguliers.

La charge du collecteur tend vers une limite qui est $\frac{M}{1-\alpha}$: on était déjà peu éloigné de la limite au 15e contact, car à partir de ce moment la charge ne doit plus augmenter que de $\frac{1}{16}$ pour un nombre de contacts indéfini.

925. M. Angot (1) a fait un grand nombre d'expériences pour vérifier les propriétés de la pile de Volta, surtout dans le cas où l'appareil est isolé. Il s'est servi d'une pile à colonne, montée avec des rondelles de drap ou de papier mouillé, et isolée par des pieds en gomme laque.

Une pareille pile étant abandonnée à elle-même pendant une

(1) *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*, 2e série, t. III, p. 285.

demi-journée, on pouvait admettre que la distribution des potentiels avait acquis l'état régulier qu'elle aurait pris directement, s'il eût été possible de maintenir tous les éléments isolés. En mettant le pôle supérieur en communication avec un électromètre, on observa une déviation de 5,1. Un instant après, la même pile fut mise en communication avec le sol par le pôle opposé, puis isolée; le pôle supérieur donna alors à l'électromètre une déviation égale à 10,4, c'est-à-dire double de la précédente, ce qui est conforme à la théorie.

L'étude de la pile complétement isolée est difficile, parce que les déperditions sont très-lentes et que l'appareil, après avoir été touché pour une expérience, doit être ensuite abandonné à lui-même pendant assez longtemps. On pourrait bien réunir le milieu de la pile avec le sol avant chaque mesure, mais il faudrait, pour cela, être assuré que les deux moitiés de la colonne sont parfaitement symétriques, et cette condition est rarement réalisée d'une manière suffisante.

L'expérience réussit beaucoup mieux quand la pile est d'abord reliée avec le sol par un de ses pôles, puis isolée au moment de faire une observation. On met alors le pôle opposé en communication, soit avec un électromètre, soit avec un condensateur; dans ce dernier cas, on détermine ensuite la charge du condensateur par l'électromètre, en appliquant la règle des partages électriques. Voici quelques expériences pour lesquelles la pile a été directement reliée à l'électromètre :

NOMBRE DES COUPLES n	HAUTEUR DE LA PILE h	CAPACITÉ ÉLECTRIQUE K	DÉVIATIONS		$\frac{\delta_1}{\delta_0}$	
			PILE NON ISOLÉE δ_0	PILE ISOLÉE δ_1	OBS.	CALC.
10	6,15	3,57	15	1,3	11,5	12,7
20	12,45	4,85	35,5	3,8	9,35	9,6
30	18,9	5,89	53,5	6,6	8,11	8,06
40	21,4	6,27	71	9,35	7,6	7,6
40	25,	6,84	75	10,35	7,24	7,08
66	38,4	8,6	112	19	5,92	5,8

M. Angot faisait varier la capacité de la pile indépendamment
› la force électromotrice, en superposant, par exemple, plu-
eurs disques de Volta, sans y placer de drap intermédiaire, de
anière à augmenter la hauteur de la colonne sans modifier le
›mbre des couples, ou inversement. Connaissant la capacité
ectrique d'un cylindre de mêmes dimensions que la pile (345),
s capacités de l'électromètre et du condensateur, on pouvait
lculer dans chaque cas le rapport des déviations obtenues,
ivant que la pile était isolée ou maintenue en communication
rmanente avec le sol.

M. Angot a recherché aussi dans quelques cas la position de
lément neutre. Pour cela, la pile étant isolée, puis mise en
mmunication avec un condensateur, on touchait avec le fil de
lectromètre un élément de rang déterminé. On observait, en
néral, une déviation, mais on répétait l'expérience jusqu'à
que l'on trouvât par tâtonnements, soit un élément neutre,
it deux éléments voisins de signes contraires. L'accord du
lcul avec l'expérience est aussi satisfaisant qu'on peut l'es-
rer, comme on le voit par les résultats suivants :

CAPACITÉ DU CONDENSATEUR	NOMBRE D'ÉLÉMENTS	CAPACITÉ DE LA PILE	RANG DE L'ÉLÉMENT NEUTRE	
			OBSERVÉ	CALCULÉ
24,5	20	4,89	5	4,35
10,4	»	»	6	7,4
9,05	»	»	7	8
24,5	40	6,80	11	9,7
10,4	»	«	15—16	16,8
9,05	»	«	17	18,1
120	40	6,82	3	3,15
70,9	»	»	5	4,51
39,8	»	»	6	6,85
21,2	»	»	12	10,8
120	60	8,65	5	5,03
70,9	»	»	8	7,52
39,8	»	»	12	11,7
21,2	»	»	19—20	18,4

926. **Mesures absolues des forces électromotrices.** — M. Thomson a trouvé par des mesures faites avec l'électromètre absolu que, si les deux pôles d'une pile de Daniell de 1000 couples communiquent avec deux plateaux parallèles éloignés d'un millimètre, l'attraction électrique des plateaux est de $5^{gr},70$ par décimètre carré. On en déduit aisément par les formules connues (277) que la différence de potentiel des deux pôles, exprimée en nombres absolus (milligramme, millimètre), est égale à 3,78. La force électromotrice d'un couple Daniell est donc

$$E_{\text{Daniell}} = 0{,}00378.$$

927. M. Branly a déduit aussi de ses expériences (923) une mesure absolue de la force électromotrice d'un couple de Volta (zinc-eau-cuivre), mais le nombre auquel il est arrivé doit être corrigé de plusieurs inadvertances commises dans le calcul.

Si les deux boules de sa balance, électrisées par l'un des pôles d'une pile non isolée, ont des charges q et q', et si la distance de leurs centres est égale à d, M. Branly représente la répulsion f qui s'exerce entre elles par la formule approchée

$$f = \frac{qq'}{d^2}.$$

Il admet encore que le potentiel de chaque boule est dû seulement à la charge qu'elle possède, de sorte qu'en appelant V ce potentiel, r et r' les rayons des deux boules, on aurait

$$V = \frac{q}{r} = \frac{q'}{r'}.$$

L'une des boules avait $8^{cm},12$ de rayon et l'autre $8^{mm},4$, ce qui donne

$$\frac{q}{8{,}12} = \frac{q'}{8{,}4}, \quad q' = q\,\frac{8{,}4}{8{,}12} = q \times 1{,}03;$$

on en déduit

$$f = \frac{q^2}{d^2} \times 1{,}03.$$

En appliquant cette formule à l'expérience dans laquelle les

boules étaient électrisées par une pile de 200 couples, et où la distance d était égale à $29^{mm},86$, M. Branly trouve

$$q = 5295,$$

d'où résulterait pour la charge d'un seul couple

$$q_1 = 26,46.$$

Mais ce nombre doit être divisé d'abord par 110, parce que la longueur du bras de levier a été oubliée dans une des formules; en outre, comme M. Branly prend pour unité de force celle qui communique à la masse de 1 milligramme une accélération de 1 millimètre, nous devons encore diviser la force par g pour revenir à nos unités, ce qui donne en définitive, pour la répulsion produite par un seul couple,

$$f_1 = \frac{(26,46)^2 1,05}{(110)^2 g\,(29,86)^2} = (0,0000824)^2.$$

Enfin, les boules étaient trop rapprochées pour qu'on pût négliger leur influence réciproque. Le rapport c de la distance des centres à la valeur moyenne du rayon était

$$c = \frac{29,86}{\frac{8,42 + 8,4}{2}} = 3,616.$$

Ce nombre rentre dans les tables calculées par M. Thomson pour l'action de deux sphères (239); on a alors, puisque les potentiels sont égaux,

$$f_1 = 2\,(B - A)\,V^2.$$

Pour cette valeur de c on trouve, d'après la table,

$$B = 0,052,$$
$$A = 0,0302;$$

ce qui donne

$$V = \sqrt{\frac{f_1}{2\,(B - A)}} = \frac{0,0000824}{\sqrt{0,0436}} = 0,00395.$$

Une autre expérience de M. Branly donne pour le couple zinc-cau-platine

$$V = 0,00395 \times \frac{3,62}{3,26} = 0,00438.$$

Ces nombres sont un peu supérieurs à celui de M. Thomson, bien que la pile de Volta à eau ait une force électromotrice plus faible que la pile de Daniell; mais la différence peut s'expliquer simplement par la répulsion qui s'exerçait aussi, dans l'électromètre de M. Branly, entre les tiges des deux boules.

928. Davy avait constaté déjà [1] qu'avec une pile de 2 000 couples de Volta (eau acidulée), il pouvait obtenir une étincelle entre deux cônes de charbon rapprochés à la distance d'un demi-millimètre environ. Si l'on admet que la différence de potentiel nécessaire pour cette décharge spontanée entre les pointes de charbon est la même qu'entre deux plateaux, et qu'elle soit, pour cette distance, égale à 7,3, d'après les expériences de M. Thomson (465), on aura

$$E_{\text{Volta}} = \frac{7,3}{2000} = 0,00365.$$

M. Gassiot [2] a obtenu aussi entre deux plateaux une étincelle d'environ $\frac{1}{1000}$ de pouce, c'est-à-dire à peu près $\frac{1}{40}$ de millimètre, avec 100 couples de Grove parfaitement isolés. On en déduirait de la même manière

$$E_{\text{Grove}} = \frac{1,355}{100} = 0,0155,$$

ce qui serait un nombre beaucoup trop fort.

Si l'on admet que la distance explosive est proportionnelle au nombre des couples, il en résulte qu'une étincelle d'un millimètre correspond à 4 000 couples environ, ce qui donne

$$E_{\text{Grove}} = \frac{12,4}{4000} = 0,0031.$$

M. Gaugain (470) provoqua de même une étincelle de $0^{mm},26$ au moyen de 1 140 couples de Pulvermacher, qui ne sont autre chose que des couples de Volta d'une forme particulière. Il en résulte encore

$$E_{\text{Volta}} = \frac{4,7}{1140} = 0,0041.$$

[1] *Bibl. britann.*, t. LIII, p. 225 (1813).
[2] *Brit. assoc. report* (1846). — *Notices and abstracts*, p. 47.

La concordance de tous ces résultats doit paraître extrêmement remarquable.

929. Enfin, il est intéressant de comparer les différences de potentiel des piles avec celles que donnent les machines électriques. Si nous admettons que la production d'une étincelle d'un millimètre, entre deux boules de 20 millimètres de diamètre, exige une différence de potentiel égale à 18,5 en valeur absolue (481), et qu'une distance explosive de 20 centimètres exige une différence de potentiel 25 fois plus grande (479), on voit qu'une machine capable de provoquer de pareilles étincelles (et la machine de Holtz est dans ce cas) possède une force électromotrice égale à celle d'un nombre de couples Daniell donné par l'expression

$$\frac{18{,}5 \times 25}{0{,}00378} = 122000.$$

M. Rossetti a résolu cette question d'une manière différente, en appliquant les lois d'Ohm à l'intensité du courant produit par une machine de Holtz dans un circuit extérieur de très-grande résistance (874). Il a conclu de ses expériences que la force électromotrice et la résistance intérieure de la machine sont toutes deux constantes, si la vitesse de rotation et l'humidité de l'air restent invariables ; que la force électromotrice diminue un peu quand l'état hygrométrique augmente, mais ne dépend pas de la vitesse de rotation ; que la résistance intérieure, au contraire, est indépendante de l'état hygrométrique, mais décroît à mesure que la vitesse augmente, rapidement d'abord, puis plus lentement, et paraît tendre vers une valeur minimum. Enfin, M. Rossetti a trouvé que la force électromotrice maximum de la machine de Holtz est environ 52 000 fois plus grande que celle du couple Daniell et 30 000 fois plus grande que celle du couple de Grove. Ces derniers résultats sont inférieurs de plus de moitié à ceux que nous avons déduits de la longueur des étincelles.

CHAPITRE XV

DES SOURCES D'ÉLECTRICITÉ (SUITE)

PHÉNOMÈNES THERMOÉLECTRIQUES.

930. **Circuits de plusieurs métaux.** — Quand un circuit métallique fermé est maintenu à une température constante, la somme algébrique des tensions aux différents points de contact est nulle et il ne se produit pas de courant électrique ; mais la loi de Volta cesse d'être exacte si les différents contacts ou soudures sont à des températures différentes ; ce fait important a été découvert par Seebeck en 1821 (1).

Pour le démontrer, on forme un circuit avec un barreau de bismuth BB′ (fig. 259) aux extrémités duquel sont soudées les branches d'une lame de cuivre CC′ courbée en fer à cheval, et l'on met dans l'intérieur de ce cadre une aiguille aimantée. En chauffant l'une des soudures avec une lampe à l'alcool, on voit l'aiguille se dévier et indiquer un courant qui va du bismuth au cuivre à travers la soudure chauffée. Avec un circuit de cuivre et d'antimoine, le courant va au contraire du cuivre à l'antimoine à travers la soudure chaude. Enfin, comme on peut le prévoir d'après ces deux premiers résultats, l'effet est maximum avec un cadre de bismuth et d'antimoine. Dans ces conditions, si l'on emploie un système astatique d'aiguilles aimantées, il suffit de toucher à la main l'une des soudures pour ob-

(1) *Mémoires de l'Académie de Berlin*, t. IX, p. 265. — *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXII, p. 199.

tenir un courant manifeste qui va du bismuth à l'antimoine à travers la soudure chauffée.

Il y a donc là une force électromotrice nouvelle capable de produire des courants qu'on a appelés *thermoélectriques* ; avant d'en établir les lois, il importe d'étudier davantage les conditions dans lesquelles elle se manifeste.

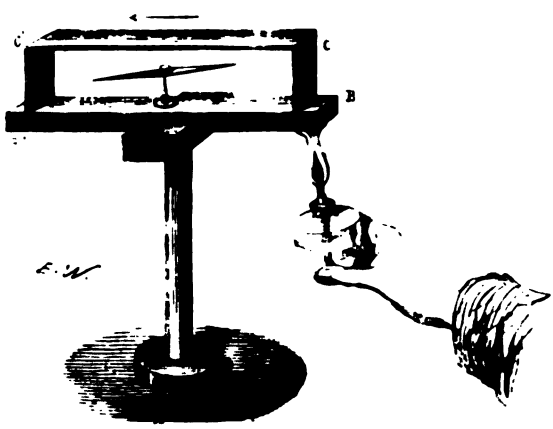


Fig. 259.

On obtient des effets du même genre en chauffant la soudure de deux métaux quelconques; mais Seebeck et Sturgeon ont trouvé qu'il peut aussi se produire des courants dans un circuit composé d'un seul métal.

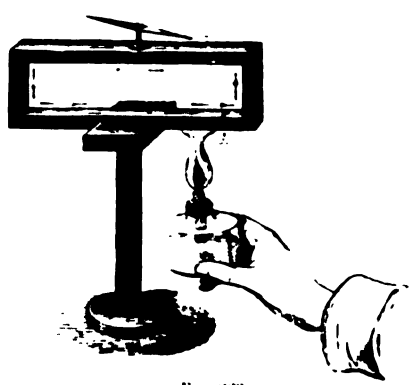


Fig. 260.

951. **Circuits formés d'un seul métal.** — L'expérience réussit d'abord avec les métaux cristallisés. On emploie, par exemple, un cadre de bismuth ou d'antimoine (fig. 260) sur lequel on place une petite aiguille aimantée ; en chauffant différents points, on observe des courants qui vont tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre. Entre

les régions dont l'échauffement donne lieu à des courants de sens contraires, il y a des points *neutres* tels que A, que l'on peut échauffer sans provoquer de courant appréciable.

M. Matteucci (1) a reconnu que ces points neutres correspondent à des régions où le métal a été refroidi brusquement et où les cristaux ne présentent pas d'orientation particulière, à l'inverse de ce qui a lieu dans le reste du métal; remarquant que la propagation de la chaleur doit se faire d'une manière différente dans les zones inégalement cristallisées, il a assimilé ces courants à ceux que M. Becquerel a obtenus par le contact de deux parties inégalement chaudes d'un même métal.

Il avait cru observer aussi que, quand on chauffe la région voisine d'un point neutre, le courant allait toujours de la partie chaude à la partie froide à travers le point neutre pour l'antimoine, du froid au chaud au contraire pour le bismuth, et que le sens du courant à travers le point neutre ne dépendait que de la nature du métal. M. Gaugain (2) a fait remarquer que cette relation ne peut être exacte. En effet, si deux points neutres A et B d'un barreau de bismuth jouissent de la propriété indiquée, il en résulte qu'en chauffant l'intervalle de ces deux points au voisinage du point A, on obtiendra un courant marchant du point neutre vers la partie chauffée et, par suite, allant de A en B. En chauffant, au contraire, un point voisin de B, on obtiendra un courant dirigé de B en A; entre les deux régions qui, ainsi chauffées, provoquent des courants de sens contraires, il se trouvera nécessairement un troisième point neutre C. Ce nouveau point neutre, situé entre les deux premiers, jouira de propriétés différentes : quand on chauffera une région voisine, le courant, à partir de la partie chauffée, devra cette fois se rapprocher du point neutre.

Pour constater ces courants, il n'est pas nécessaire que le circuit soit entièrement formé d'un même métal; il suffit de réunir par un fil de cuivre et un galvanomètre les extrémités du barreau à étudier, en ayant soin de ne pas chauffer les points d'attache du fil de cuivre. M. Gaugain a coulé, par exemple, du bismuth dans un tube de verre recourbé deux fois, et, ayant

(1) *Bibl. universelle de Genève*, 2e série, t. XVIII, p. 355 (1858).
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 5e série, t. LXV, p. 5.

réuni les branches à un galvanomètre, il a chauffé différents points de la partie moyenne; il a trouvé ainsi 5 points neutres jouissant alternativement de propriétés contraires, comme les pôles d'un barreau aimanté à points conséquents. Un tel barreau se comporte donc exactement comme un circuit hétérogène, à cause des inégalités de structure qui sont dues à des états différents de cristallisation.

932. On a fait beaucoup de tentatives pour obtenir de semblables courants en chauffant différents points d'un même métal non cristallisable et, par suite, parfaitement homogène. M. Becquerel (1), par exemple, a indiqué à ce sujet plusieurs expériences curieuses.

Les fils d'un galvanomètre sont terminés par deux petites

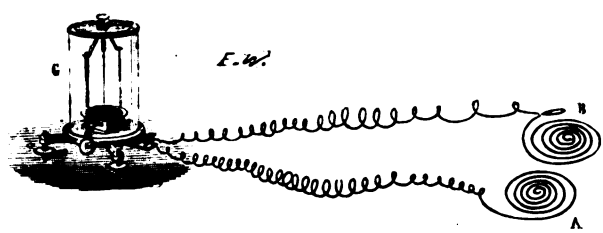


Fig. 261.

spirales de platine A et B (fig. 261). On chauffe l'une d'elles, puis on l'applique sur l'autre; il se produit un courant qui va de la spirale chaude à la froide, à travers le contact, et qui persiste tant que les températures sont inégales.

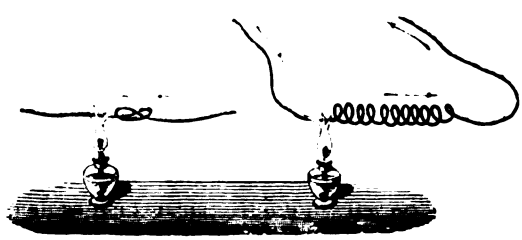


Fig. 262.

Si l'on chauffe un point quelconque d'un fil de platine con-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXIII, p. 135.

tinu réuni à un galvanomètre, on n'obtient aucun courant. Si ce fil forme un nœud et qu'on chauffe un point voisin du nœud, il se produit un courant qui va de la partie chauffée vers le nœud. La même chose a lieu si le nœud est remplacé par une hélice (fig. 262).

Cette propriété n'appartient pas exclusivement au platine. Le palladium donne les mêmes résultats, mais on n'obtient rien avec un fil d'or et il se produit des courants très-faibles avec des fils d'argent ou de cuivre. Il suffit, par exemple, de croiser l'un sur l'autre deux bouts du fil de cuivre communiquant avec les bornes d'un galvanomètre et de chauffer avec une lampe à alcool un point voisin du contact, pour obtenir un courant qui persiste tant qu'on n'enlève pas la lampe.

M. Becquerel avait même construit, d'après ce principe, une pile thermoélectrique composée uniquement de fils de cuivre. Pour cela, un fil f attaché à un tube de verre AB (fig. 263), est réuni par un crochet a à un autre fil semblable qui s'enroule en-

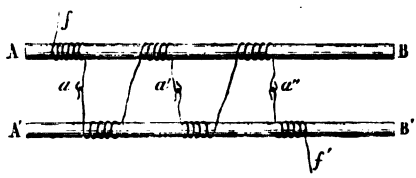


Fig. 263.

suite sur un autre tube A' B', revient au premier, puis se rattache par un crochet a' à un troisième bout, etc. En plongeant le tube A'B' dans de l'eau chaude, on obtient une série de courants qui vont tous de la partie chauffée au crochet voisin : ces courants ayant tous la même direction s'ajoutent dans le circuit total et donnent un courant résultant dont l'intensité est proportionnelle au nombre des contacts.

Une autre expérience de même ordre consiste à terminer les deux bouts du fil d'un galvanomètre par des cônes de cuivre dont l'un a été chauffé. Il se produit un courant si l'on applique les cônes en croix l'un sur l'autre, mais rien d'appréciable si les cônes sont ajoutés bout à bout.

M. Becquerel attribuait la production des courants dans ces diverses expériences à une propagation inégale de la chaleur de

part et d'autre du point du contact, par suite d'un défaut d'homogénéité, ou d'une différence de section des conducteurs.

933. Toutefois, des expériences nombreuses ont montré qu'on n'obtient aucun courant thermoélectrique avec un circuit homogène, quelles que soient les différences de section. M. Matteucci [1] a essayé sans succès le contact de deux couches de mercure à des températures différentes. Le mercure était placé dans trois capsules successives dont l'intermédiaire était chauffée, et on les réunissait par des siphons à mercure. Magnus [2] a répété la

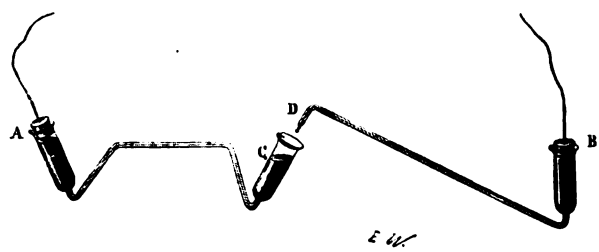


Fig. 264 [3].

même expérience d'une manière plus simple, comme l'indique la figure 264. On peut chauffer le tube capillaire D, qui renferme du mercure, et le plonger dans l'entonnoir C dont le liquide est maintenu à la température ordinaire, ou bien chauffer l'entonnoir et y plonger le tube capillaire froid : dans les deux cas, il ne se produit pas de courant appréciable.

De même une baguette de cuivre de 7 millimètres de diamètre (fig. 265) a été réduite au tour à une épaisseur de 1 millimètre sur une longueur de 13 millimètres. En mettant cette baguette

Fig. 265.

dans un circuit fermé muni d'un galvanomètre, on pouvait la

(1) *Bibl. universelle de Genève*, 2e série, t. XII, p. 211 (1837).

(2) *Pogg. Ann.*, t. LXXXIII, p. 469. — *Annales de Chimie et de Physique*. 3e série, t. XXXIV, p. 105.

(3) Je dois, avant de terminer cet ouvrage, exprimer tous mes remerciements à M. Gavarret pour les nombreuses figures qu'il m'a permis d'emprunter à son *Traité d'électricité*.

chauffer en un point quelconque, sur la portion amincie ou au contact *g* des deux sections différentes, sans produire le moindre courant. L'inégal réfroidissement par rayonnement n'intervient pas non plus, car l'expérience ne réussit pas davantage quand on couvre une partie de la baguette d'un vernis quelconque ou d'une couche de noir de fumée.

Une variation de température continue dans un milieu homogène ne peut donc provoquer aucune dissymétrie électrique, mais les moindres altérations suffisent pour produire un courant. Ainsi, quand on dépose par la galvanoplastie une légère couche de cuivre sur une portion d'un fil d'argentan, l'échauffement du point de contact des parties nues et couvertes donnent lieu à un courant. Il en serait de même pour une légère couche d'oxyde, de sulfure, etc., et l'on comprend qu'il se produise quelque chose d'analogue dans la plupart des expériences où l'on croit opérer avec un circuit homogène. Les expériences de M. Gaugain conduisent aux mêmes conséquences.

934. M. Gaugain a montré d'abord que, dans l'expérience des spirales de M. Becquerel, l'effet obtenu est le même qu'avec un seul contact de deux fils. Si une spirale chaude M (fig. 266) est appliquée sur un fil froid N qu'elle touche en plusieurs points *a*, *b*, *c*, le courant allant de la partie chaude à la partie froide à travers le contact, on voit aisément que les contacts tels que *a* et *b* tendent à se neutraliser; l'expérience indique en effet que le courant est le même que si le contact en *c* existait seul.

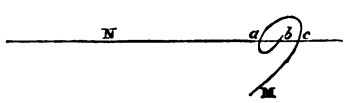


Fig. 266.

Ce contact intervient aussi de la même manière dans les expériences du nœud et de l'hélice, car on n'obtient rien si on essaie de les répéter avec des hélices dont les différentes spires ne se touchent pas, ou des nœuds dont les fils restent éloignés; les courants se manifestent, au contraire, aussitôt qu'on écrase le nœud ou l'hélice de façon à provoquer des contacts. Ces différentes expériences sont donc ramenées au cas du croisement de deux fils. M. Gaugain a étudié ainsi différents métaux dont il avait soin de bien nettoyer les surfaces avant d'établir les contacts. Il a constaté que pour le platine, l'étain et l'argent le courant va du

chaud au froid à travers le contact; que le courant va au contraire du froid au chaud pour l'or, le plomb, le cuivre et le fer. Avec le zinc, la direction du courant est variable avec la température du bout chauffé.

Si le courant dépend uniquement de ce qui se passe au contact des fils, il doit se produire dans les deux boucles d'un fil fermé replié sur lui-même en un point. On peut, en effet, réunir deux galvanomètres par deux fils de platine appliqués l'un sur l'autre : en chauffant un point voisin du contact C (fig. 267), les galvanomètres indiquent l'existence de courants qui marchent, comme le montrent les flèches, du fil chaud au fil froid à travers le contact.

Fig. 267.

L'expérience suivante de M. Gaugain jette un jour nouveau sur ces phénomènes et permet de concevoir quelle peut être l'influence des oxydations superficielles. Quand on croise deux fils d'argent, nous avons dit que le courant va du fil chaud au fil froid à travers le contact; mais, si l'on sépare les deux fils par une mince feuille de platine, il y a inversion. Dans ce cas, il existe en réalité deux contacts voisins entre l'argent et le platine; quoique la différence des températures soit très-faible, elle suffit à produire un courant thermoélectrique dont le sens est déterminé par le contact le plus chaud. Toute couche mince d'oxyde doit produire un effet analogue à celui de cette lame de platine; si donc cette manière de voir est exacte, il doit être possible de prévoir quel sera le sens du courant dans le cas du croisement de deux fils de même nature.

M. Gaugain, par des expériences directes sur différents métaux purs ou altérés, a établi la liste suivante :

Fer oxydé,	Or,
Platine,	Zinc,
Argent carburé,	Cuivre oxydé,
Cuivre,	Fer,
Argent,	Fer carburé.

Quand on chauffe le contact de deux quelconques des corps de cette liste, on obtient un courant qui traverse le contact en allant du corps supérieur vers l'inférieur. Cela étant, si l'on croise

deux fils identiques dont l'un a été chauffé, il peut arriver, comme dans le cas du fer, que le fil chauffé se recouvre d'une couche d'oxyde et qu'il se produise en réalité deux contacts à des températures différentes entre les couches d'oxyde et les métaux. Or, d'après la liste précédente, le courant à travers le contact chaud va de l'oxyde au métal pour le fer; dans le croisement des fils, le courant doit donc marcher du fil froid au fil chaud, ce qui est conforme à l'expérience. Ce raisonnement ne pourrait pas être étendu à tous les métaux, puisque l'oxydation du cuivre a pour effet d'intervertir le sens du courant qui se produit au contact de deux fils froid et chaud; mais les observations ingénieuses de M. Gaugain sur le rôle des couches minces superficielles permettent de faire rentrer dans le cas des contacts hétérogènes la plupart des faits observés par M. Becquerel.

935. Des modifications mécaniques, telles que la trempe et l'écrouissage, produisent dans les métaux des différences de structure analogues aux inégalités de cristallisation et suffisent pour provoquer des courants thermoélectriques. Ici encore on ne peut pas attribuer les courants à une différence dans la propagation de la chaleur, parce que le recuit ou l'écrouissage ne modifient pas d'une manière sensible les conductibilités intérieure ou extérieure d'un métal.

Si l'on prend, par exemple, un fil qui a été durci par la filière ou le martelage et dont une partie seulement a été recuite, l'échauffement du point de contact des deux régions donne lieu à un courant. Magnus a constaté que, pour la plupart des métaux, le courant va de la partie recuite à la partie écrouie; mais la règle n'est pas générale, et le contraire a lieu pour l'argentan, le zinc, l'étain, le fer et le plomb.

Fig. 268.

La chaleur de la main dans certains cas peut donner un courant appréciable. Magnus enroule sur une monture en bois (fig. 268) un fil de laiton écroui de manière à former par le fil les côtés d'un cadre rectangulaire. Deux côtés opposés de ce cadre ayant été ensuite recuits, il suffit de le tenir entre les doigts de manière à toucher

deux angles opposés, C et D ou E et F, pour obtenir un courant dans un sens ou dans l'autre; l'appareil fonctionne comme une pile thermoélectrique.

936. On peut encore faire des expériences analogues d'une manière très-simple, comme l'a indiqué M. Gaugain. On prend un long fil de zinc recuit à une température élevée et on le chauffe avec une lampe à alcool. Il n'y a pas de courant si la lampe est stationnaire ; mais, si on la déplace le long du fil, on obtient un courant qui marche dans le sens du mouvement de la lampe. La même expérience réussit avec un fil d'un métal quelconque, pourvu qu'il soit écroui. Le cuivre, par exemple, donne encore un courant qui va dans le sens du mouvement de la lampe, c'est-à-dire de la partie recuite à la partie écrouie, comme dans les expériences de Magnus. Toutefois, il y a des cas pour lesquels le courant obtenu par le déplacement de la lampe est inverse de celui que donnerait l'échauffement du contact de deux parties, l'une recuite et l'autre écrouie.

937. Enfin M. Thomson [1] a montré que les actions mécaniques passagères, telles que la traction, la pression, la torsion, etc., produisent des effets analogues à la trempe.

Lorsqu'un fil de fer est tendu sur une partie de sa longueur, pressé longitudinalement ou transversalement, ou soumis à une opération mécanique quelconque, l'échauffement d'un point voisin de la séparation des deux parties différentes donne encore un courant qui va du fil modifié au fil libre.

M. Le Roux [2] a repris les expériences de M. Thomson relativement à la traction. Il a constaté que le courant va du métal tendu au métal libre pour le palladium, le fer, l'acier, le platine, l'argent, le laiton, et en sens contraire pour le zinc et le cuivre. Il y a toutefois des différences notables entre les résultats obtenus par ces deux physiciens. Ainsi, M. Thomson avait trouvé que pour le fer et le cuivre, tirés dans les mêmes conditions, le rapport des intensités des courants est égal à 4,2, tandis que M. Le Roux a obtenu la valeur 15,5 pour le même rapport.

938. M. Le Roux a cherché à expliquer par des phénomènes

(1) *Phil. trans.* (1856), p. 649. — *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LIV, p. 105.

(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. X, p. 201.

de tension moléculaire quelques-unes des expériences de M. Becquerel. Il admet que, lorsque deux corps à des températures différentes sont rapprochés au contact, les variations rapides de température dans le voisinage du contact produisent des tensions moléculaires assez énergiques pour donner naissance à des courants. C'est ainsi, par exemple, qu'avec deux bouts de platine dont l'un a été chauffé, on n'obtient pas de courant appréciable si on les rapproche par leurs bases bien dressées (fig. 269); le courant devient sensible quand on appuie les fils l'un sur l'autre en les laissant parallèles; les effets sont encore plus marqués quand on dispose les fils comme l'indique la

Fig. 269.

Fig. 270.

Fig. 271.

Fig. 272.

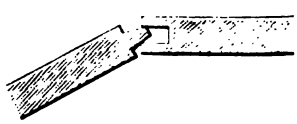


Fig. 273.

figure 270, et enfin l'intensité du courant est maximum quand les fils sont croisés (fig. 271). De même, avec un gros fil de laiton, le courant est très-faible (8°) quand deux bouts taillés convenablement sont rapprochés comme l'indique la figure 272, et devient beaucoup plus grand (20°) si on les rapproche obliquement (fig. 273).

On voit bien que, dans ces différentes expériences, le courant est d'autant plus énergique que l'échange de chaleur entre les deux fils se fait d'une manière plus dissymétrique, mais cette même circonstance favorise aussi l'inégalité de température des deux surfaces de la couche altérée que l'on peut supposer exister sur le fil chaud, d'après l'explication de M. Gaugain. Il ne pa-

rait donc pas démontré que là encore les courants ne soient dus à des contacts hétérogènes.

M. Le Roux a répété aussi l'expérience de Magnus sur les tiges de cuivre de diamètres différents, et il a obtenu des courants sensibles, quoique faibles, allant de la partie chauffée de la tige vers le fil aminci. De même, quand on creuse au tour une entaille en forme de V sur une tige de laiton, et qu'on chauffe l'une des parties voisines de l'entaille, on obtient, à mesure qu'on laisse de moins en moins de matière, un courant qui augmente d'abord, puis diminue, puis augmente de nouveau et acquiert, au moment où il ne reste presque plus de métal pour la jonction des deux pièces, un nouveau maximum presque égal à celui que donne le contact. Ne pourrait-on pas encore attribuer ces derniers phénomènes à l'écrouissage que l'on a communiqué à la partie amincie par le travail de la lime ou du ciseau? Dans ce cas, le rôle d'une tension moléculaire attribuable aux variations de température resterait à démontrer.

939. **Circuits à liquides.** — Les liquides donnent aussi, indépendamment des forces électromotrices de contact ordinaires, de véritables courants thermoélectriques. Nous avons vu que le contact de couches de mercure inégalement chaudes ne produit aucun effet électrique; M. Ed. Becquerel (1) a vérifié, à l'aide d'un appareil très-simple, qu'il en est de même pour tous les liquides. Le liquide est renfermé dans une boule B (fig. 274) qui communique par des tubes en siphons avec deux verres L et L' dans lesquels plongent deux lames d'or ou de platine. On peut chauffer un point quelconque de la colonne de liquide renfermée dans le tube et la boule, sans qu'il y ait trace de courant.

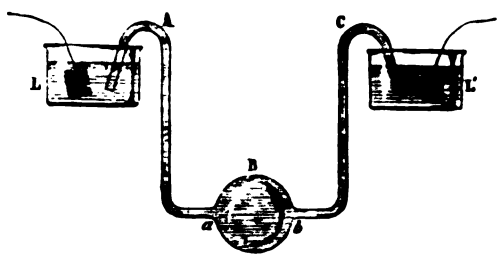


Fig. 274.

Pour échauffer la surface de contact de deux liquides différents, M. Wild se sert de l'appareil que nous avons déjà décrit.

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. VIII, p. 389.

Les deux branches verticales (fig. 275) contiennent à leur partie inférieure des colonnes d'un même liquide L, réunies vers la partie supérieure par un liquide différent L', ce qui donne deux surfaces de contact A et B, sur lesquelles on met deux thermomètres T et T'. L'un des contacts A est entouré d'un manchon dans lequel on peut faire passer un courant de vapeur. Les deux lames de métal inférieures sont plongées dans deux vases V et V' contenant de l'eau, pour être maintenues à température constante, et communiquent avec un galvanomètre. Le courant est nul tant que les thermomètres T et T' sont à la même température, et il devient manifeste dès que les températures sont différentes. Dans les expériences de M. Wild, les températures des surfaces de séparation étaient respectivement de 55° et de 20° ; l'acide sulfurique étendu, de densité égale à 1,05, et une dissolution de sulfate de cuivre de 1,10 de densité, ont déterminé dans un galvanomètre une déviation de 72° contraire à une déviation primitive de 10°. Une dissolution de sulfate de zinc, de densité égale à 1,20, et une dissolution de sulfate de magnésie, de densité égale à 1,05, ont donné une déviation de 20°, contraire à une déviation primitive de 3° seulement. Toutefois, il importe de remarquer que, par suite de la diffusion, il se forme peu à peu au voisinage de la surface de séparation un mélange qui équivaut à un troisième liquide interposé, et la somme des forces électromotrices des deux nouveaux contacts n'est pas toujours égale à celle qui résulterait du contact direct des liquides primitifs.

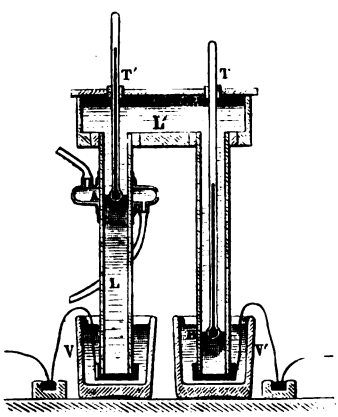


Fig. 275.

940. La disposition employée par M. Ed. Becquerel est encore plus simple. Dans un tube AG (fig. 276) recourbé plusieurs fois et muni d'ouvertures convenables C, E, on introduit avec précaution, pour éviter tout mélange, deux liquides de den-

sités différentes, de manière que la surface de séparation soit située dans la branche moyenne ; celle-ci est entourée d'un vase renfermant de l'eau dans laquelle est placé un thermomètre. Les branches extrêmes sont réunies par des lames de platine à un galvanomètre. Dans ces conditions, le courant n'est jamais nul si la température est la même dans toute la colonne liquide ; mais, quand on chauffe ou qu'on refroidit le liquide du manchon, l'intensité du courant change dans un sens ou dans l'autre, ce qui prouve bien l'influence de la température. Il est facile, d'ailleurs, d'employer trois colonnes de liquides différents, pour éviter les courants dus aux forces électromotrices de contact et ne laisser subsister que l'effet thermoélectrique.

Les résultats de M. Becquerel ne sont pas tout à fait d'accord avec ceux de M. Wild. L'intensité du courant s'accrut en général, plus ou moins rapidement, quand on échauffa la surface de contact des deux liquides. Cependant, avec une dissolution de persulfure de potassium et une dissolution étendue de sulfate de potasse, qui donnaient un courant initial très-énergique, une variation de température de 85° ne modifia pas l'intensité d'une manière sensible.

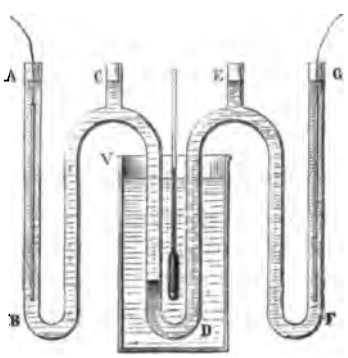


Fig. 276.

Enfin, il en est de même pour le contact des liquides et des métaux. Pour le démontrer, il suffit de mettre un seul liquide dans l'appareil de M. Wild et de chauffer l'un des vases dans lesquels plongent les tubes verticaux ; avec l'appareil de M. Ed. Becquerel, on placera dans un manchon l'une des deux branches extrêmes, de manière à chauffer le contact du liquide avec la lame de platine. Quelle que soit la disposition, on constate que l'échauffement de la surface de contact du liquide avec le métal produit un courant, s'il n'en existait pas, ou modifie celui qui existait d'abord.

941. **Lois des courants thermoélectriques.** — Toutes les lois

des phénomènes thermoélectriques sont des conséquences directes de la loi des tensions de Volta, si l'on admet seulement que la différence des potentiels ou la tension de deux métaux en contact est variable avec la température.

Pour conserver les mêmes notations que précédemment, nous continuerons de représenter par $M|M'$ la tension du contact de deux métaux M et M', le premier étant positif, de sorte que, si l'on pouvait réunir ces deux métaux par un fil extérieur sans contact nouveau, il se produirait un courant allant de M en M' par le fil, ou de M' en M à travers le contact. Dans les mémoires de thermoélectricité, au contraire, on représente souvent la force électromotrice en disposant les métaux dans le sens que suit le courant à travers la soudure; dans le cas actuel, on écrirait $(M' - M)$. Nous pourrons donc employer ces deux symboles $(M' - M)$ et $M|M'$ comme équivalents.

La tension de contact étant une fonction de la température, nous indiquerons cette température au-dessous du symbole qui désigne la tension : l'expression $\frac{M|M'}{T}$ désignera la tension de contact des métaux M et M' à la température T. Enfin, on a souvent à représenter la différence des tensions de contact de deux métaux identiques à des températures différentes; nous indiquerons pour cela, au-dessous du symbole de la tension, les deux températures des points de contact. On aura ainsi, par définition,

$$\frac{M|M'}{T-T'} = \frac{M|M'}{T} - \frac{M|M'}{T'}.$$

Rappelons encore que, dans un circuit métallique fermé à température constante, la somme algébrique des tensions de contact est nulle de sorte que, si l'on parcourt le circuit dans un sens déterminé, on a

$$\sum \frac{M|M'}{T} = 0;$$

pour qu'il se manifeste un courant, il est nécessaire que deux soudures au moins du circuit ne soient pas à la même température.

Les courants thermoélectriques sont soumis aux deux lois suivantes, qui ont été découvertes par M. Becquerel :

1° *Loi des métaux intermédiaires.* — Si deux métaux A et B, faisant partie d'un circuit, sont séparés par un ou plusieurs métaux intermédiaires, maintenus à une même température T, la force électromotrice est la même que si, les métaux intermédiaires n'existant pas, le contact direct des métaux A et B était porté à la même température T.

Supposons, en effet, qu'il y ait un métal interposé M, on déduit immédiatement de la loi de Volta

$$\frac{A|B}{T} = \frac{A|M}{T} + \frac{M|B}{T},$$

et la même relation aura lieu quel que soit le nombre des métaux interposés.

Il résulte de là une conséquence pratique importante, c'est que, pour établir le contact de deux métaux, on peut les réunir par une soudure étrangère de nature quelconque, sans rien changer aux phénomènes.

Une autre conséquence est que la force électromotrice produite par l'échauffement des soudures de deux métaux A et B, à des températures différentes T et T', est la somme algébrique des forces électromotrices produites pour les mêmes températures entre le métal A et un métal intermédiaire M, et entre celui-ci et le second métal B, de sorte que l'on a

$$\frac{A|B}{T-T'} = \frac{A|M}{T-T'} + \frac{M|B}{T-T'}.$$

En effet, la loi de Volta donne les équations

$$\frac{A|B}{T} = \frac{A|M}{T} + \frac{M|B}{T},$$
$$\frac{A|B}{T'} = \frac{A|M}{T'} + \frac{M|B}{T'}.$$

En retranchant ces deux équations, membre à membre, on obtient immédiatement l'équation proposée.

2° *Loi des températures successives.* — La force électromo-

trice produite par l'échauffement des soudures de deux métaux entre des températures T et T′ est la somme des forces électromotrices produites, l'une entre la température T et une température intermédiaire θ, l'autre entre les températures θ et T′.

Cette loi se traduit par l'équation

$$\frac{A|B}{T-T'}=\frac{A|B}{T-\theta}+\frac{A|B}{\theta-T'},$$

qui est évidente, puisqu'elle se réduit à la suivante

$$\frac{A|B}{T}-\frac{A|B}{T'}=\frac{A|B}{T}-\frac{A|B}{\theta}+\frac{A|B}{\theta}-\frac{A|B}{T'},$$

laquelle est une identité.

942. **Vérifications expérimentales.** — M. Becquerel (1) a établi la classification suivante d'un certain nombre de métaux, en commençant par les plus négatifs, c'est-à-dire que, pour deux métaux quelconques de la liste, le courant traverse la soudure chaude en allant du métal supérieur vers le métal inférieur.

Bismuth,	Or,
Platine,	Argent,
Plomb,	Zinc,
Étain,	Fer,
Cuivre.	Antimoine.

Pour comparer ces métaux, M. Becquerel formait un circuit fermé, renfermant un galvanomètre, avec une série de métaux disposés de manière à obtenir un grand nombre de contacts différents, comme l'indique, par exemple, la combinaison suivante, fig. 277.

Il plaçait la plupart des soudures dans un bain de glace fondante, et en chauffait une ou plusieurs à la température de 20°; on pouvait ainsi obtenir le même résultat que si le circuit eût été formé seulement de deux métaux.

Ainsi, en chauffant la soudure *a* seule, le courant était dû à la force électromotrice de contact du cuivre et du fer entre les

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XLI, p. 353.

deux températures 0° et 20°. En effet, le courant était exactement le même si l'on chauffait seulement la soudure *a*, ou bien si l'on portait en même temps à la température de 20° les soudures successives *a*, *b*, *c*, *d* et *e* ; ce résultat est conforme à la première loi.

La même loi se vérifie par la comparaison des intensités des

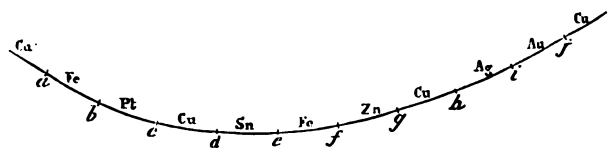


Fig. 277.

courants obtenus. Voici des nombres qui résultent d'expériences directes faites avec un même circuit total entre les températures de 0° et de 20°. On a pris pour unité le courant produit entre le zinc et le cuivre.

COUPLES DE MÉTAUX	INTENSITÉ DU COURANT	
	OBSERVÉE	CALCULÉE
Argent — Fer	26,20	25,74
Cuivre — Fer	27,96	27,74
Étain — Fer	31,24	31,46
Platine — Fer	36,07	36,51 — 36,29
Cuivre — Zinc	1	»
Or — Argent	0,50	»
Cuivre — Argent	2	»
Étain — Cuivre	3,50	»
Platine — Cuivre	8,55	»

Le courant produit par les soudures fer et cuivre peut se déduire des résultats obtenus avec le fer et l'étain, l'étain et le cuivre. On a, en effet,

$$Fe|Cu = Fe|Sn + Sn|Cu = Fe|Sn - Cu|Sn = 31,24 - 3,50 = 27,74,$$

au lieu de 27,96 qui résulte de l'observation directe.

On a, de même,

$$Fe|Sn = Fe|Cu + Cu|Sn = 31,46$$
$$Fe|Ag = Fe|Sn + Sn|Cu + Cu|Ag = Fe|Sn - Cu|Sn - Ag|Cu = 25,74,$$
$$Fe|Pt = Fe|Cu + Cu|Pt = 36,51$$
$$= Fe|Sn + Sn|Cu + Cu|Pt = 36,29.$$

La concordance du calcul et de l'observation est aussi satisfaisante que le permet la précision des expériences.

Comme la loi des métaux intermédiaires était déjà vérifiée par l'échauffement simultané des soudures successives, il résulte de cette deuxième série d'expériences une conséquence très-importante : c'est que dans un circuit déterminé l'intensité du courant, évaluée par les procédés galvanométriques ordinaires, est proportionnelle à la somme algébrique des tensions de contact, ou à la force électromotrice qui existe dans le circuit. Nous admettrons ce résultat d'une manière générale, ce qui permettra d'évaluer les différences de potentiel de contact par les courants.

943. M. Becquerel envisageait les phénomènes autrement : il attribuait la production des courants aux conductibilités différentes des métaux, caractérisées pour chacun d'eux par un *pouvoir électrique* particulier, de sorte que l'intensité du courant produit par l'échauffement inégal des soudures de deux métaux serait proportionnelle à la différence de leurs pouvoirs électriques. En désignant par *Fe*, *Pt*, *Ag*.... les pouvoirs électriques des différents métaux, on aurait donc

$$Fe - Ag = 26,20$$
$$Fe - Cu = 27,96$$
$$\vdots \qquad \vdots$$
$$Cu - Pt = 8,55$$

On pouvait déduire de ces équations le pouvoir électrique d'un métal quelconque en fonction de l'un d'eux, celui du fer, par exemple, qu'il aurait fallu connaître. Pour tourner cette difficulté, M. Becquerel remarquait que le cuivre, l'or et l'argent donnent à peu près les mêmes résultats, et que la seule autre propriété commune à ces trois métaux est l'égalité des pouvoirs émissifs pour la chaleur rayonnante. Il admit alors que les pouvoirs électriques de deux métaux sont, d'une manière générale,

proportionnels à leurs pouvoirs émissifs. Comme les pouvoirs émissifs du fer et du cuivre, en particulier, sont environ dans le rapport de 15 à 12, il en résulte

$$\frac{Fe}{Cu} = \frac{15}{12},$$

équation qui permet de déterminer les pouvoirs électriques des différents métaux. On obtient ainsi :

MÉTAUX	POUVOIRS ÉLECTRIQUES
Fer.	133,50
Argent.	107,30
Or.	106,80
Zinc.	106,54
Cuivre.	104,54
Étain.	102,26
Platine.	97,50

Cette manière de concevoir les phénomènes ne constitue pas une théorie que l'on puisse discuter; elle a été bientôt complétement abandonnée.

Dans un autre travail (1), M. Becquerel a établi la loi des températures successives. Ainsi, avec un couple de cuivre et de fer, l'intensité du courant était représentée par 11 lorsque les soudures étaient l'une à zéro et l'autre à 50°; l'intensité fut encore égale à 11 entre 50° et 100°, et à 18 entre 100° et 250°. Or, l'expérience directe a donné une intensité de 40 lorsque l'une des soudures fut à zéro et l'autre à 250°, c'est-à-dire égale à la somme des intensités observées entre 0°, 50°, 100° et 250°.

944. **Variation des forces électromotrices avec la température. — Couples à marche uniforme.** — Pouillet (2) employait un couple de bismuth et de cuivre (fig. 278) formé par un barreau de bismuth B figurant trois côtés d'un rectangle, aux extrémités duquel étaient soudés des fils de cuivre C et C' reliés à une

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXXI, p. 371.
(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. IV, p. 515.

boussole des tangentes. Les deux branches du couple étaient plongées dans des vases en verre V et V' renfermant, l'un de l'eau chaude, l'autre de la glace fondante ou un mélange réfrigérant. L'intensité des courants obtenus s'est montrée proportionnelle à la différence des températures depuis — 17° jusqu'à 80°.

M. Regnault (1) a étudié aussi un couple de bismuth et d'antimoine formé de deux barreaux semblables en fer à cheval appliqués l'un sur l'autre et soudés à leurs extrémités. Le barreau d'antimoine était coupé au milieu et les deux côtés de la section réunis à un galvanomètre. Le courant produit par une différence

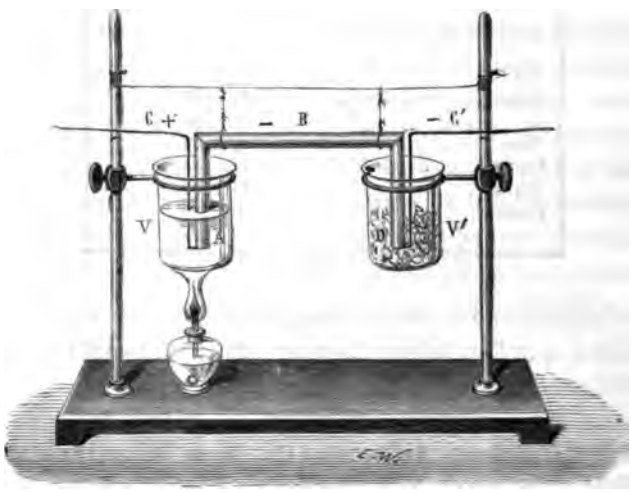


Fig. 278.

de 1° entre les températures des deux soudures donnait toujours la même déviation 17° de l'aiguille, quelle que fût la température absolue de chacune d'elles, depuis 15° jusqu'à 35°. Si la différence des tensions des deux contacts est toujours la même pour une différence de température de 1°, il en résulte que chacune des tensions varie proportionnellement à la température, et qu'entre deux températures quelconques T et t, la force électromotrice est proportionnelle à la différence $T - t$ des températures.

Toutefois M. Regnault a cru pouvoir déduire d'autres expé-

(1) *Mémoires de l'Académie des sciences*, t. XXI, p. 240.

riences que l'accroissement de force électromotrice

$$\frac{E}{T+1-t} - \frac{E}{T-t}$$

dû à une augmentation de 1° pour la différence des températures des soudures est d'autant plus faible que la température T de la soudure chaude est plus élevée. Il faisait passer dans les fils d'un galvanomètre différentiel, d'une part le courant du couple thermoélectrique, et d'autre part le courant d'un couple à liquides dont il modifiait l'intensité par l'introduction de résistances convenables, jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre fût ramenée au zéro. Il élevait alors de 1° la température de la soudure chaude et notait la déviation de l'aiguille. Cette déviation, qui devrait être toujours la même, s'est montrée d'autant plus faible que la température initiale T était plus élevée, la température t restant constante.

Pour expliquer la contradiction qui existe entre ces deux expériences, M. Gaugain fait remarquer que, si les fils d'un galvanomètre différentiel sont absolument identiques, l'aiguille reste au zéro lorsque les courants qui traversent ces fils sont égaux; mais, si l'identité des deux systèmes de fils qui entourent le cadre de l'aiguille n'est pas absolue, des courants égaux ne laisseront pas l'aiguille au zéro, et cette position d'équilibre aura lieu seulement pour le cas où les intensités des courants seront dans un rapport déterminé, différent de l'unité. En augmentant alors d'une quantité constante l'intensité de l'un des courants, on voit que la déviation dépendra, non-seulement de cet excès, mais aussi des intensités primitives. Les galvanomètres différentiels ne satisfont presque jamais à la condition de symétrie absolue, et cette circonstance suffit pour rendre compte des résultats observés par M. Regnault.

945. M. Gaugain a publié un travail important sur la variation des forces électromotrices des couples thermoélectriques avec la température, en déterminant ces forces par une méthode d'opposition. Il a examiné d'abord la marche du couple Bismuth-Cuivre. Il prit, pour cela, deux couples aussi identiques que possible et trois bains liquides, l'un contenant de l'eau chauffée à une température T voisine de l'ébullition, l'autre de l'eau

froide ordinaire à la température t, et le troisième à une température intermédiaire θ. Les soudures de chacun des couples étaient plongées, l'une dans le bain intermédiaire, l'autre dans l'un des bains extrêmes. Ces deux couples, placés bout à bout sur le trajet d'un circuit muni d'un galvanomètre, étaient disposés de façon que les courants fussent de sens contraires ; on modifiait par tâtonnements la température du bain intermédiaire, en ajoutant de l'eau froide ou chaude, jusqu'à ce que le courant résultant fût nul. La force électromotrice due à l'excès de température $T - \theta$ était alors égale à celle que produisait l'excès $\theta - t$; M. Gaugain a trouvé que ces différences de température sont aussi égales. Voici, comme exemple, la moyenne de 12 expériences :

$T = 92°,65$	$T - \theta = 37°,15$
$\theta = 55,80$	$\theta - t = 37,16$
$t = 18,64$	

La vérification n'est pas toujours aussi satisfaisante pour les expériences isolées, mais cela tient au défaut d'identité des deux couples. On élimine cette cause d'erreur en intervertissant le rôle des couples et prenant la moyenne des observations, ce qui rétablit l'accord des résultats.

M. Gaugain a éprouvé de grandes difficultés à préparer des couples Bismuth-Cuivre jouissant à peu près des mêmes propriétés, et il a constaté que les différences que l'on observe ne tiennent, ni à la nature des soudures, ni au recuit ou aux impuretés du cuivre, mais seulement à la cristallisation du bismuth. Ces différences peuvent atteindre $\frac{1}{10}$ ou plus des forces électromotrices elles-mêmes, et il arrive quelquefois que deux branches d'un même couple ne sont pas identiques ; pour s'en assurer, on plonge les deux soudures dans un même bain et l'on constate qu'il se produit un courant. Ces irrégularités des couples qui renferment des métaux cristallisables, comme le bismuth, nuisent beaucoup à l'emploi de la méthode d'opposition de M. J. Regnauld [1] pour la détermination des forces électromotrices.

M. Gaugain a cherché d'autres couples pouvant servir d'étalons et qui fussent toujours identiques. L'argent et le cuivre,

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LXIV, p. 453.

mieux encore l'or et le cuivre remplissent parfaitement cette condition. Le couple Cuivre-Or, étudié depuis 20° jusqu'à 300°, a toujours donné une force électromotrice proportionnelle à la différence des températures. Ce nouveau couple, comparé à un autre couple Bismuth-Cuivre très-régulier dont il s'est souvent servi, a donné

$$\frac{Au\,|\,Cu}{80^\circ - 20^\circ} = 0{,}96\,\frac{Cu\,|\,Bi}{21^\circ - 20^\circ},$$

c'est-à-dire que la force électromotrice du nouvel étalon $Au\,|\,Cu$ était environ 62,5 fois plus faible que celle du couple $Cu\,|\,Bi$, entre les mêmes limites de température.

946. **Couples à marche non uniforme.** — La marche des phénomènes est rarement aussi régulière. L'intensité du courant fourni par un couple augmente généralement avec la différence des températures, mais suivant une loi différente, et il arrive quelquefois qu'en échauffant progressivement l'une des soudures, l'autre étant à température constante, le courant, qui croît d'abord, passe par un maximum, puis diminue et finit par changer de signe. Cette inversion des courants a été observée pour la première fois par Cumming (1).

M. Becquerel a constaté le même phénomène avec différents couples dont il maintenait à zéro l'une des soudures.

Pour le couple	Or-Zinc	l'inversion a lieu à . .	150°
—	Argent-Zinc	— . .	225°
—	Cuivre-Fer	—	au rouge sombre.

Les variations des courants sont souvent assez irrégulières. Avec le couple Argent-Zinc, dont l'une des soudures était à zéro, M. Becquerel a constaté, par exemple, que la déviation de l'aiguille allait d'abord croissant jusqu'à la température de 120°, pour laquelle elle était de 10 degrés. A partir de là, le courant diminuait, devenait nul à 225°, puis changeait de sens et atteignait un nouveau maximum de 14 degrés pour la température de 300°; quand on chauffait davantage, la déviation diminuait de nouveau. M. Becquerel attribuait ces effets d'inversion à un changement dans l'ordre des conductibilités produit par une

(1) Thomson, *Annal. phil.*, t. VI, 2e série, p. 321 (1823).

agrégation différente des molécules à différentes températures; mais nous verrons que cette explication est insuffisante.

947. M. Gaugain a fait des expériences nombreuses avec les 11 métaux suivants, qui se rangent à peu près dans l'ordre déjà indiqué par M. Becquerel :

Bismuth,	Argent,
Mercure,	Or,
Platine,	Zinc,
Étain,	Fer,
Plomb,	Antimoine.
Cuivre,	

En combinant ces métaux deux à deux, on pourrait obtenir 55 couples différents; mais, en vertu de la loi des métaux intermédiaires, il suffirait de comparer l'un quelconque des métaux avec tous les autres, ce qui donnerait 10 couples seulement, pour calculer les forces électromotrices de toutes les autres combinaisons. En réalité, M. Gaugain a étudié 17 couples, ce qui lui a permis d'obtenir de nombreuses vérifications.

Chacun des couples était comparé directement par la méthode des trois bains avec un même couple Bismuth-Cuivre, la température du bain le plus froid étant toujours d'environ 20°. Le couple étudié X était plongé dans les bains extrêmes aux températures T et t, et le couple étalon dans les bains aux températures t et θ. En représentant par A la force électromotrice du couple Bismuth-Cuivre entre les températures de 20° et 21°, on pouvait écrire, puisque la marche de ce couple est uniforme,

$$\frac{Cu|Bi}{\theta - t} = \left(\frac{Cu|Bi}{21^\circ - 20^\circ}\right) \times (\theta - t) = A(\theta - t);$$

par suite, lorsque la température du bain intermédiaire avait été réglée de façon que l'équilibre avec le nouveau couple fût établi, on avait

$$\frac{X}{T - t} = A(\theta - t).$$

L'expression $A\,\frac{\theta - t}{T - t}$ est la force électromotrice moyenne du couple proposé pour une variation de température de 1°.

Le couple étalon n'était jamais porté à une température supérieure à 75° et, quand la force électromotrice du couple à comparer était trop faible, on en ajoutait plusieurs, de manière à constituer une petite pile.

Pour former les couples, on plongeait dans un tube de verre fermé deux fils métalliques, et on les réunissait dans le fond du tube par une soudure de nature quelconque, pourvu qu'elle fût conductrice, telle que mercure, amalgame liquide, etc. L'un des fils de métal était en outre entouré d'un tube de verre, afin qu'il n'y eût entre eux aucun contact en dehors de la soudure. Pour maintenir cette soudure à une température déterminée, il suffisait de plonger dans un bain le tube qui renfermait le couple.

Les différentes expériences étant faites entre les températures T et t, celle-ci voisine de 20°, on traduisait les résultats par une courbe dont les abscisses représentaient la température T, et les ordonnées la force électromotrice $\frac{X}{T-t}$ ou $A(\theta-t)$. Toutes ces courbes coupent nécessairement l'axe des abscisses au point qui correspond à la température de 20°; elles s'élèvent ensuite en ligne droite pour les couples à marche régulière, et présentent des formes différentes pour les autres.

1° M. Gaugain a constaté d'abord que ces courbes peuvent être représentées d'une manière très-approchée par des équations du second degré, ce qui en rend la discussion très-facile.

2° Si deux métaux M et N n'ont pas été comparés entre eux et qu'ils l'aient été séparément à un autre métal A, la force électromotrice de ces métaux M et N s'obtiendra par la différence des ordonnées des courbes qui représentent leurs forces électromotrices avec le métal A. On a, en effet, entre les mêmes limites de température,

$$M|N = M|A + A|N = M|A - N|A.$$

M. Gaugain a constaté plusieurs fois l'exactitude de cette relation, autant que le permet la précision des expériences.

3° Bien que la soudure froide ait été maintenue à la température de 20° dans tous les cas, on peut obtenir la force électromotrice de deux métaux A et B, entre deux températures quelconques t et t', par la différence des ordonnées correspondantes;

car on a, d'après la loi des températures successives,

$$\frac{A|B}{t-20}=\frac{A|B}{t-t'}+\frac{A|B}{t'-20},$$

d'où l'on déduit

$$\frac{A|B}{t-t'}=\frac{A|B}{t-20}-\frac{A|B}{t'-20}.$$

Il suffit donc de mener une horizontale par le point qui correspond à la température t'; les ordonnées comptées à partir de cette droite représentent les forces électromotrices pour une température de $t'°$ à la soudure froide.

4° On peut préciser les conditions dans lesquelles a lieu l'inversion du courant avec deux métaux déterminés. On voit d'abord que, si la courbe est convexe vers la partie supérieure et vient ensuite couper l'axe des abscisses, l'intensité du courant ira en croissant avec la température de la soudure chaude, puis passera par un maximum et deviendra nulle pour changer ensuite de signe. Ainsi la courbe relative à un couple Zinc-Fer, dont les métaux étaient soudés avec de l'amalgame de zinc et dont le zinc avait été recuit à 400°, a donné un maximum égal à 13,1 pour la température de 198° ou, plus exactement, pour les températures (198° — 20°), et la courbe prolongée indiquerait une inversion pour (376° — 20°). L'expérience montra en effet que l'inversion du courant pour le couple $\frac{Fe|Zn}{T-20°}$ avait lieu au-dessous de la température de fusion du zinc, laquelle est de 440°.

Mais on obtient plus facilement les inversions en élevant la température de la soudure froide. Si une parallèle à l'axe des abscisses coupe la courbe en deux points qui correspondent aux températures t et T, les forces électromotrices $\frac{E}{t-20}$ et $\frac{E}{T-20}$ sont égales; si la soudure froide est maintenue à $t°$, l'inversion aura lieu pour la température T à la soudure chaude. La courbe relative au couple Zinc-Fer indiquait que le courant devait être nul pour les températures de 100° et de 295°. L'expérience a été faite en maintenant l'une des soudures dans l'eau bouillante; l'autre soudure a été chauffée lentement dans un bain d'huile jusqu'à

ce que le courant devint nul, puis changeât de signe ; on a ensuite laissé refroidir le bain et noté la température à laquelle le courant passait de nouveau par zéro. On a obtenu ainsi 296°,3 en montant et 290°,9 en descendant ; les différences s'expliquent par le retard de la température du couple sur celle du bain, et la moyenne 293°,6 ne diffère pas sensiblement du nombre déterminé par la courbe.

Il résulte de là qu'on ne peut pas expliquer l'inversion du courant par un changement dans l'ordre des conductibilités des deux métaux, comme le pensait M. Becquerel. Ainsi, un circuit formé de zinc et de fer étant tout entier à 20°, ainsi que l'air ambiant, il faudra porter l'une des soudures à 376° pour qu'il y ait inversion du courant et c'est alors que devrait avoir lieu le changement des conductibilités. Mais, si la température de l'air et du circuit est de 40°, l'inversion du courant a lieu pour la température de 356° ; l'ordre des conductibilités devrait maintenant changer à cette température, ce qui est inadmissible.

Nous renvoyons au mémoire de M. Gaugain pour l'examen plus complet de ces phénomènes d'inversion, pour l'étude des différents couples en particulier et la discussion de toutes les circonstances, telle que des traces de matières étrangères, qui modifient la force électromotrice.

On trouvera aussi des résultats très-remarquables dans le mémoire de M. Ed. Becquerel sur la détermination des forces électromotrices de différents couples thermoélectriques formés avec des métaux, des alliages, des composés métalliques, sulfures, oxydes, etc. Quelques-uns de ces couples ont des forces électromotrices relativement considérables, et on a pu s'en servir pour construire des piles dont l'usage est déjà très-répandu.

948. **Applications à la thermométrie.** — Les courants thermoélectriques ont été surtout appliqués à la détermination des températures dans les cas ou les thermomètres ordinaires ne conviennent pas.

La pile thermoélectrique de Nobili (1) se compose d'une série de barreaux parallèles de bismuth et d'antimoine, réunis en paquet, et soudés deux à deux de manière à former une chaine

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XLVIII, p. 198.

continue. Si l'on parcourt le circuit dans un sens déterminé en numérotant les soudures, on voit que toutes les soudures impaires dans lesquelles on passe, par exemple, du bismuth à l'antimoine, sont situées d'un côté de la pile, et toutes les soudures paires, de l'antimoine au bismuth, de l'autre côté. Si les deux faces de la pile sont à des températures inégales, on obtient un courant d'autant plus intense que la différence des températures est plus grande et les soudures plus nombreuses ; le courant change de sens si le rôle des deux faces est interverti.

Cet appareil est surtout employé dans des recherches de chaleur rayonnante. Pour cela, la pile (fig. 279) est renfermée dans une monture en ivoire qui porte deux bornes P et P′ où aboutissent les extrémités de la chaîne ; ces deux bornes sont mises en communication avec un galvanomètre. Les deux faces de la pile sont garanties des échauffements irréguliers par deux chapeaux en cuivre T et T′ munis d'opercules S et S′ que l'on peut fermer et ouvrir à volonté. Une bonne pile thermoélectrique réunie à un galvanomètre sensible peut indiquer, par exemple, la chaleur rayonnée par la main à la distance de 4 ou 5 mètres. On conçoit, d'après cela, combien il y a de précautions à prendre pour éviter les causes d'erreur dans les expériences de chaleur rayonnante.

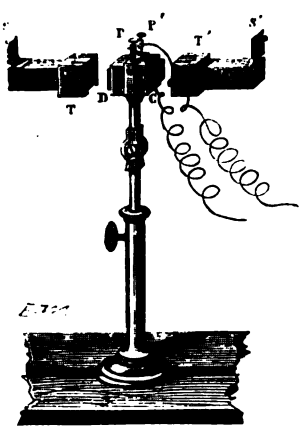


Fig. 279.

Il est important de connaître le rapport qui existe entre la quantité de chaleur que reçoit la pile pendant l'unité de temps et la déviation de l'aiguille du galvanomètre. Lorsque l'action de la source de chaleur sur la pile est permanente, les soudures s'échauffent peu à peu, mais en même temps elles rayonnent de la chaleur et il arrive un moment où la température reste constante, la quantité de chaleur reçue de la source étant à chaque instant égale à celle qui se dissémine par rayonnement ; alors le courant est constant et l'aiguille stationnaire. La quantité de

chaleur rayonnée par la pile étant proportionnelle à l'excès de la température sur la température ambiante, d'après la loi de Newton, on voit que la quantité de chaleur qu'elle reçoit est proportionnelle à l'échauffement des soudures, et par suite à l'intensité du courant. Toutefois, il faut mieux graduer l'appareil par le phénomène calorifique lui-même ; nous n'entrerons pas dans le détail de ces expériences.

949. Peltier (1) a imaginé, d'après les mêmes principes, une pince thermoélectrique dont il s'est servi pour manifester de faibles variations de température produites dans les métaux par le passage des courants électriques. Cette pince, qui est un véritable thermomètre de contact, se compose de deux couples C et C' (fig. 280) formés l'un barreau de bismuth *b* et d'un barreau d'antimoine *a*, soudés directement ou par l'intermédiaire d'une petite lame métallique. Ces deux couples sont réunis par un fil F et communiquent d'autre part avec un galvanomètre. Si les deux soudures sont appliquées sur les faces opposées d'une barre de métal M, on pourra mettre en évidence de très-faibles changements de température au point touché.

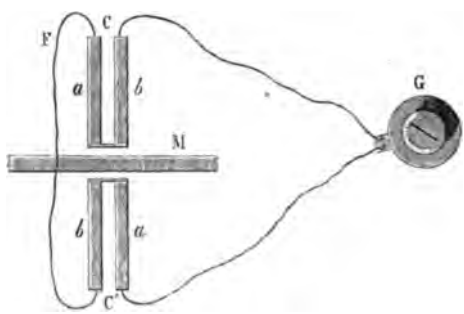


Fig. 280.

Les aiguilles thermoélectriques de M. Becquerel (2) se composent essentiellement de deux soudures fer et cuivre situées en sens contraires dans un même circuit. Si le circuit renferme un galvanomètre très-sensible, on pourra manifester des différences de température extrêmement faibles entre les soudures; il suffira donc de maintenir l'une d'elles à température constante, pour déterminer la température du point où se trouve l'autre soudure. Ces appareils, qui ont été modifiés successivement par différents physiciens, peuvent être employés dans beaucoup de cas où les

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. LVI, p. 371.
(2) *Id.*, 2e série, t. LIX, p. 113.

thermomètres à liquides seraient hors d'usage. On peut les introduire, par exemple, sous forme d'aiguilles très-effilées, dans l'intérieur d'organes vivants et déterminer ainsi sans aucune lésion des différences de température extrêmement faibles, comme celle qui existe entre le sang qui va du cœur au poumon et celui qui revient du poumon vers le cœur.

Pouillet [1] employa, sous le nom de pyromètre thermo-électrique, un couple formé par un fil de platine qui passait dans l'axe d'un canon de fusil en fer, sans le toucher, et venait se souder à la culasse ; l'autre extrémité du canon était reliée au fil de platine par un circuit renfermant un galvanomètre. La culasse était introduite dans le four, et on évaluait la température par l'intensité du courant. Pour faire l'expérience exactement, il faudrait maintenir constante la température de la deuxième soudure, mais en réalité cette précaution était inutile parce que l'appareil n'était destiné qu'aux températures très-élevées. Pouillet reconnut qu'à partir de 600° l'intensité du courant croissait moins rapidement que la température de la soudure chaude, et il graduait son appareil par comparaison avec un thermomètre à air.

M. Ed. Becquerel [2] a étudié avec beaucoup de soin la marche de quelques couples thermoélectriques, en particulier du couple Platine-Palladium. La force électromotrice de ce couple varie d'une manière très-régulière, et la température T peut être déterminée en fonction de l'intensité I du courant par une expression de la forme

$$\log \frac{T^3}{I^2} = A - \frac{B}{T},$$

dans laquelle A et B sont des constantes à déterminer par expérience. La comparaison de cette formule avec les données du thermomètre à air a donné les résultats les plus concordants.

950. M. Regnault s'était préoccupé de l'emploi des piles thermoélectriques pour la mesure des températures. Il a montré, comme nous l'avons vu, que l'intensité du courant produit par un couple de bismuth et d'antimoine, dont les soudures sont à des

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. III, p. 788.
[2] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LXVIII, p. 49.

températures différant de 1°, est indépendante de la température absolue, entre les limites de 15° et 35°; mais il n'en est plus de même pour les couples que l'on emploie à la détermination des températures élevées, comme le couple Platine-Fer. Il graduait un pareil couple en le comparant au couple normal Bismuth-Antimoine. Pour cela, les soudures du couple proposé étant aux températures T' et t', il déterminait à quelles températures T et t il fallait porter les soudures du couple normal pour que le courant fût nul dans un circuit où ces deux couples étaient opposés. Les températures inférieures t et t' étant sensiblement constantes, il construisait une courbe ayant pour abscisses les différences $T - t$, et pour ordonnées les différences $T' - t'$. Cette courbe une fois construite, on déterminait dans une expérience la température T' du couple Platine-Fer en cherchant par tâtonnements la différence des températures $T - t$ du compte normal qui était nécessaire pour rétablir l'équilibre. Cette différence, étant toujours faible, était évaluée par des thermomètres à mercure; en prenant le point correspondant de la courbe, on avait $T' - t'$ et, par suite, T'. La méthode d'opposition, dans laquelle on ramène le courant à zéro, donne des résultats qui sont à l'abri de la graduation du galvanomètre et des modifications que peut éprouver le magnétisme des aiguilles.

Toutefois, M. Regnault condamne en principe l'usage des couples thermoélectriques et ne l'admet que pour les cas où tout procédé autre direct ne serait pas applicable. Il a remarqué que les courbes de comparaison de deux couples ne se reproduisent jamais identiquement dans des expériences successives; parfois même le phénomène n'est pas continu, il se manifeste des sauts brusques qui indiquent des changements moléculaires dans les métaux. M. Regnault n'a d'ailleurs employé ces moyens thermométriques que pour des cas, comme le refroidissement des gaz par la détente ou la compression, dans lesquels il faut noter, pour ainsi dire, des variations instantanées, inappréciables par le thermomètre à mercure.

Les travaux plus récents relatifs à la détermination des températures par les courants thermoélectriques ne paraissent pas devoir modifier cette conclusion; si l'on a recours à ce procédé dans des expériences de précision, il faudra toujours être en

garde contre les défauts du galvanomètre et les irrégularités des couples eux-mêmes.

LOIS DE LA PROPAGATION DE L'ÉLECTRICITÉ.

951. **Principes généraux.** — De toutes les expériences qui précèdent on peut conclure déjà qu'il existe entre les forces électromotrices de contact les mêmes relations qu'entre les intensités des courants permanents que ces forces électromotrices sont capables de provoquer dans un même circuit fermé. Nous ne pouvons pas quitter ce sujet sans parler des lois qui relient la propagation de l'électricité avec la nature des circuits qu'elle parcourt. Ces lois ont été découvertes par Ohm en 1827.

Dans un circuit métallique dont toutes les soudures sont à la même température, le potentiel est constant dans toute l'étendue de chaque métal et varie de l'un à l'autre d'une manière rapide à chacun des contacts. Si l'une des soudures est à une température différente, la loi de Volta n'est plus satisfaite, les deux extrémités d'un même conducteur sont à des potentiels différents, et il s'y produit un flux d'électricité qui persiste tant que la différence des potentiels est maintenue. C'est un courant d'électricité dans un sens déterminé, si l'on admet l'hypothèse d'un seul fluide, ou bien, dans l'hypothèse de deux fluides, l'ensemble de deux courants d'électricités différentes se propageant en sens contraires; on prend, comme sens du courant, celui dans lequel marche l'électricité positive.

Considérons, par exemple, une barre cylindrique située dans l'air et terminée à deux soudures. Les potentiels des extrémités ne sont pas égaux et leur différence est déterminée par les températures des points de contact; d'une extrémité à l'autre, le potentiel varie d'une manière continue. Le milieu extérieur étant infiniment moins conducteur que le métal, on peut négliger en général les pertes qui ont lieu par la surface, et le flux d'électricité est parallèle aux génératrices du cylindre.

Le phénomène électrique qui se produit dans cette barre est donc entièrement comparable aux échanges de chaleur qui ont lieu dans un milieu indéfini, conducteur de la chaleur, et li-

mité par des plans parallèles à des températures constantes. Si les actions élémentaires obéissent aux mêmes lois dans les deux cas, il est clair que l'on arrivera ainsi aux formules établies par Fourier pour la propagation de la chaleur.

Ce raisonnement, sauf le choix des expressions, est à peu près identique à celui d'Ohm (1). Quand un fil conducteur est en équilibre électrique, Ohm considère tous les points de ce milieu comme étant dans le même état électrique, à la même *tension*, cette tension étant analogue à la température pour les phénomènes calorifiques. Lorsque l'équilibre n'a pas lieu, il se produit des échanges d'électricité, et la tension en un point est en général une fonction du temps et des coordonnées de ce point; quand une cause étrangère maintient une différence de tension constante entre différents points du conducteur, il finit par s'établir au bout d'un temps plus ou moins long un régime régulier, et la tension en chaque point devient indépendante du temps. Ohm admet ensuite qu'entre deux molécules, dont les tensions sont U et U', il se produit, pendant l'unité de temps, un flux d'électricité proportionnel à la différence des tensions U — U' et à une fonction de la distance des deux points, telle que les points les plus voisins aient une influence prédominante. C'est là sa première hypothèse. Elle est la même que celle de Fourier, si l'on remplace le mot *tension* par *température* (244).

Sans qu'il soit nécessaire de répéter les raisonnements, on voit que le flux d'électricité en un point est normal à la surface d'égale tension, analogue aux surfaces isothermes (247), qui passe en ce point; la quantité m d'électricité qui traverse un élément ds d'une surface de niveau est proportionnelle à cette surface, à la dérivée de la tension par rapport à la normale, de sorte qu'on peut écrire, en désignant par c un coefficient qui dépend de la nature du milieu,

$$m = -cds\frac{dU}{dn};$$

le signe — indique que le courant a lieu dans le sens vers lequel les tensions diminuent.

(1) *Théorie mathématique des courants électriques*, par G.-S. Ohm; traduction de M. Gaugain. — Paris, 1860.

Jusqu'ici la tension n'est définie que comme un état électrique particulier, analogue à la température dans les phénomènes de propagation de la chaleur. Ohm, d'après les idées de Volta, considère la tension comme une sorte de tendance à pousser l'électricité dans un certain sens, et il indique l'électroscope comme un moyen de la mesurer; c'est donc une propriété absolument identique au potentiel.

952. En effet, pour établir une relation entre la propagation de l'électricité et les phénomènes électrostatiques, il suffit de revenir aux raisonnements par lesquels nous avons commencé, de considérer la tension d'Ohm comme étant en chaque point le potentiel de l'électricité libre distribuée sur la surface ou dans l'intérieur du conducteur. On admettra, en outre, comme l'a fait M. Kirchhoff (1), que le flux d'électricité m, qui traverse un élément ds d'une surface du niveau, est proportionnel à la résultante des actions électriques en ce point, c'est-à-dire à la dérivée du potentiel par rapport à une normale à la surface, ce qui l'équation donne

$$m = -cds\frac{dV}{dn}.$$

On retrouve ainsi la formule élémentaire d'Ohm et l'on peut immédiatement interpréter, dans ce nouvel ordre de phénomènes, tous les résultats obtenus par la théorie pour la propagation de la chaleur dans les milieux conducteurs.

953. Supposons, par exemple, que le régime permanent soit établi dans un conducteur, de telle sorte que le potentiel en chaque point soit une fonction des coordonnées indépendante du temps. Considérons un élément cylindrique terminé à deux surfaces de niveau infiniment voisines et limité latéralement par des orthogonales; prenons trois axes de coordonnées rectangulaires dont l'un, l'axe de x, soit parallèle aux génératrices du cylindre, c'est-à-dire à la normale aux surfaces de niveau. La quantité d'électricité qui entre pendant l'unité de temps par l'une des bases ds du cylindre est égale à $-cds\frac{dV}{dx}$, et celle qui

(1) *Pogg. Ann.*, t. LXXVIII, p. 506. — *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XLI, p. 496.

s'écoule par la base opposée est égale à $-cds\left(\frac{dV}{dx}+d.\frac{dV}{dx}\right)$; comme il n'entre et ne sort rien par les surfaces latérales, il reste dans l'élément de volume un excès d'électricité égal à $-cds\frac{d^2V}{dx^2}dx$. Cet excès doit être nul si le régime permanent est atteint, il faut donc que l'on ait

$$\frac{d^2V}{dx^2}=0.$$

D'autre part, les dérivées du potentiel, par rapport aux deux autres coordonnées, sont nulles, puisque ces axes sont parallèles au plan tangent à la surface de niveau, de sorte que l'on a aussi

$$\frac{dV}{dy}=0,\ \frac{dV}{dz}=0,$$

et, par suite,

$$\frac{d^2V}{dy^2}=0,\ \frac{d^2V}{dz^2}=0.$$

On en déduit

$$\frac{d^2V}{dx^2}+\frac{d^2V}{dy^2}+\frac{d^2V}{dz^2}=0.$$

Comme cette somme des trois dérivées secondes est en général proportionnelle à la densité électrique au point considéré (142), on en conclut que *la densité électrique est nulle dans tout l'intérieur d'un conducteur traversé par un courant permanent*, chaque élément de volume renfermant des quantités égales d'électricités contraires, dans l'hypothèse des deux fluides. A la surface seulement du conducteur il y a une couche d'électricité libre, qui n'est pas en équilibre d'elle-même et qui produit les potentiels variables en différents points.

954. **Propagation dans un fil cylindrique.** — Le principe fondamental étant établi, tous les problèmes relatifs à la propagation de l'électricité dans un conducteur ne présenteront plus que des difficultés d'analyse; nous examinerons surtout le cas d'un conducteur cylindrique.

Quand un fil cylindrique, de diamètre très-petit par rapport à sa longueur, et placé de la même manière par rapport aux

corps voisins dans toute son étendue, est électrisé et en équilibre, la densité moyenne sur le contour d'une section normale est la même partout, sauf dans le voisinage des extrémités, et la distribution peut être considérée comme étant sensiblement identique à celle qui s'établirait si le fil était indéfini. Le potentiel, comme nous l'avons vu dans le calcul des condensateurs cylindriques (173), est proportionnel à la charge totale et en raison inverse de la longueur du fil; il est donc proportionnel à la densité électrique moyenne.

Supposons que, par suite d'une cause quelconque, la densité moyenne varie le long du fil en progression arithmétique, le potentiel, en un point situé loin des extrémités, sera encore proportionnel à la densité moyenne de la section correspondante; en effet, si l'on enlève l'excès d'électricité qui se trouve d'un côté, jusqu'à la distance où les actions sont négligeables, pour le porter de l'autre à la même distance, la densité moyenne et le potentiel auront partout la même valeur qu'au point considéré. Enfin, si les variations de densité suivent une autre loi quelconque qui ne soit pas très-rapide, on peut admettre encore, au moins comme première approximation, que le potentiel en chacun des points du fil est proportionnel à la densité moyenne correspondante.

955. Considérons maintenant un fil cylindrique de longueur l, de section s, dont les extrémités sont maintenues à des potentiels V_1 et V_2, placé dans un milieu non absolument isolant, de sorte qu'il s'effectue par la surface une déperdition d'électricité qui n'est pas négligeable. Ce fil sera parcouru par un courant d'électricité allant de l'extrémité où le potentiel est le plus élevé V_1 vers l'autre extrémité.

Les surfaces de niveau seront sensiblement des plans perpendiculaires aux génératrices, sauf dans le voisinage de la surface extérieure du fil, à laquelle les surfaces de niveau deviendront tangentes par des raccordements d'une très-petite amplitude. Le potentiel V sur chacun de ces plans P est, dans le cas général, une fonction du temps et de la distance x du plan considéré à un plan fixe parallèle.

Le flux d'électricité m qui s'écoule pendant un temps infiniment petit dt à travers la section correspondante au plan P a

pour expression

$$m = -cs\frac{dV}{dx}dt.$$

Le flux qui traverse une section parallèle P′, à une distance dx de la première, est de même

$$m' = -cs\left(\frac{dV}{dx} + d.\frac{dV}{dx}\right)dt.$$

Il reste donc, de ce chef, dans le cylindre compris entre les deux plans, un excès d'électricité

$$m - m' = cs\frac{d^2V}{dx^2}dxdt.$$

D'autre part, la densité électrique sur la surface extérieure étant généralement très-faible, on peut admettre que la loi de Coulomb est applicable et que la déperdition est proportionnelle à la quantité d'électricité. Désignons par γ ce que M. Gaugain appelle le *coefficient de charge*, c'est-à-dire la quantité d'électricité nécessaire pour porter l'unité de longueur du fil à un potentiel égal à l'unité ; la capacité électrique du cylindre élémentaire considéré sera γdx, la charge sera égale à $\gamma V dx$, et la déperdition pendant le temps dt pourra être représentée par $b\gamma V dxdt$. Enfin, l'excès d'électricité accumulé dans ce cylindre pendant le temps dt y produira un accroissement de potentiel correspondant dV, ce qui donne l'équation (1)

$$\gamma dx\frac{dV}{dt}dt = cs\frac{d^2V}{dx^2}dxdt - b\gamma V dxdt,$$

ou bien

$$\frac{d^2V}{dx^2} - \frac{b\gamma}{cs}V = \frac{\gamma}{cs}\cdot\frac{dV}{dt}. \qquad (1)$$

Cette équation est identique, sauf la signification de certains termes, à celle qui a été donnée par Ohm.

956. **État permanent.** — Si le régime permanent est établi, les potentiels sont alors simplement des fonctions de x ; le se-

(1) Ce raisonnement ne présente pas de difficultés dans l'hypothèse d'un seul fluide. Si l'on admet que le fil soit parcouru par deux courants d'électricités différentes et de sens contraires, il suffit de remarquer que l'élément de volume considéré éprouve par les surfaces P et P′ une perte d'électricité négative et un gain d'électricité positive, et l'on arrivera à la même équation.

cond membre de l'équation générale est nul, et il reste

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{b\gamma}{cs} V. \tag{2}$$

Supposons d'abord que la perte par l'air soit négligeable. Le coefficient b est alors nul, ce qui donne

$$\frac{d^2V}{dx^2} = 0, \text{ ou } \frac{dV}{dx} = A. \tag{3}$$

On aurait pu écrire directement cette équation en remarquant qu'il ne peut pas s'accumuler d'électricité entre deux plans parallèles, de sorte que le flux qui s'écoule à travers une section quelconque du fil est constant, c'est-à-dire que la dérivée du potentiel est constante. En intégrant de nouveau, il vient

$$V = Ax + B.$$

Pour déterminer les constantes A et B, on appliquera l'équation aux extrémités du fil, ce qui donne, en prenant l'une des extrémités comme origine des coordonnées,

$$V_1 = B,$$
$$V_2 = Al + B;$$

il en résulte

$$V = \frac{V_2 - V_1}{l} x + V_1 = V_1 - \frac{V_1 - V_2}{l} x. \tag{4}$$

Les potentiels le long du fil varient donc en progression arithmétique ; si l'on élève en chaque point une perpendiculaire dont la longueur soit proportionnelle au potentiel correspondant, les extrémités de ces ordonnées seront en ligne droite.

Le flux d'électricité pendant l'unité de temps est alors

$$M = -cs \frac{dV}{dx} = c(V_1 - V_2) \frac{s}{l} = \frac{V_1 - V_2}{\frac{l}{cs}}.$$

Or, l'étude de la décharge des batteries par les galvanomètres (328) a montré que l'intensité du courant, évaluée par la déviation d'une aiguille aimantée, est proportionnelle à la quantité d'électricité qui s'écoule pendant l'unité de temps. D'après cela, la quantité M peut être considérée comme représentant l'intensité galvanométrique du courant ; elle est proportionnelle

à la différence des potentiels des extrémités du fil, en raison inverse de sa longueur, proportionnelle à la section et à un coefficient c particulier à chaque métal. C'est la *loi d'Ohm*.

L'expression $\frac{l}{cs}$ représente encore (418) la *résistance* du fil considéré; elle pourrait être ici déterminée en nombres absolus, si l'on connaissait la différence des potentiels et le flux d'électricité, et l'on en déduirait la valeur absolue du coefficient de conductibilité. En désignant la résistance du fil par une seule lettre λ, on a donc

$$M = \frac{V_1 - V_2}{\lambda}. \tag{5}$$

Si le conducteur dont les extrémités sont aux potentiels V_1 et V_2 n'est pas cylindrique, l'intensité du courant est encore proportionnelle à la différence des potentiels, de sorte qu'elle peut être représentée par la même expression (5). On déterminera la résistance de ce conducteur, soit par le calcul, soit par expérience en le comparant avec un fil cylindrique.

957. Lorsque la perte par l'air n'est pas négligeable, il faut résoudre l'équation complète (2). Posons

$$\frac{b\gamma}{cs} = \beta^2;$$

il vient alors

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \beta^2 V.$$

L'intégrale de cette équation est

$$V = Ae^{\beta x} + Be^{-\beta x},$$

e désignant la base des logarithmes supérieurs, A et B des constantes qui restent à déterminer d'après les conditions du problème. On obtient ainsi

$$V = V_1 \frac{e^{\frac{\beta l}{2}}}{1 - e^{\beta l}} \left[e^{\beta\left(x - \frac{l}{2}\right)} - e^{-\beta\left(x - \frac{l}{2}\right)} \right] + \frac{(V_1 + V_2)e^{\beta l}}{e^{2\beta l} - 1} (e^{\beta x} - e^{-\beta x}). \tag{6}$$

Si les potentiels aux deux extrémités du fil sont égaux et de signes contraires, le second membre de cette équation se réduit au premier terme.

Si le potentiel est nul à l'une des extrémités, on obtient en faisant $V_1 = 0$,

$$(7) \qquad V = V_1 \frac{e^{\beta(l-x)} - e^{-\beta(l-x)}}{e^{\beta l} - e^{-\beta l}}.$$

958. **État variable.** — Enfin l'état permanent ne s'établit jamais d'une manière instantanée; l'état variable qui le précède est défini par l'équation générale (1) que l'on peut écrire

$$(1)' \qquad \frac{dV}{dt} = \alpha^2 \left(\frac{d^2V}{dx^2} - \beta^2 V \right),$$

en posant

$$\alpha^2 = \frac{cs}{\gamma}.$$

Dans cette équation le potentiel V est une fonction de x et de t, qui tend à devenir une simple fonction de x à mesure que le temps augmente. En désignant par V' la valeur qui correspond à l'état permanent, on peut écrire

$$V = V' + U,$$

la fonction U tendant vers zéro à mesure que le temps augmente. Si l'on substitue cette expression dans l'équation générale (1)', en faisant attention que V' est une fonction indépendante du temps et satisfait à l'équation

$$0 = \frac{d^2V'}{dx^2} - \beta^2 V',$$

on obtiendra pour déterminer U l'équation

$$\frac{dU}{dt} = \alpha^2 \left(\frac{d^2U}{dx^2} - \beta^2 U \right),$$

de même forme que la première, mais dans laquelle la fonction U est d'une nature différente, et cette circonstance rendra l'intégration plus facile.

Remarquons que $b = \alpha^2\beta^2$ et posons encore

$$U = e^{-bt} W;$$

l'équation se réduit alors à

$$\frac{dW}{dt} = \alpha^2 \frac{d^2W}{dx^2}.$$

On obtient une intégrale particulière par une expression de la forme

$$W = e^{m't}(A \sin mx + B \cos mx).$$

Si l'on cherche à vérifier l'équation proposée, on trouve que m' doit être égal à $-\alpha^2 m^2$, ce qui donne

$$(8) \qquad W = e^{-\alpha^2 m^2 t}(A \sin mx + B \cos mx).$$

Il faut maintenant préciser les conditions du problème. Supposons que le fil soit primitivement à l'état neutre, que l'extrémité où l'on place l'origine des coordonnées soit au potentiel V_1, et que l'autre extrémité soit maintenue à un potentiel nul. On voit que pour $t = 0$, on aura, quel que soit x, $V = 0$, $U = -V'$ et $W = -V'$. Pour l'une des limites $x = 0$, on aura, quel que soit le temps, $V = V_1$, $U = 0$, $W = 0$. Pour l'autre limite $x = l$, on a de même $V = 0$, $U = 0$ et $W = 0$.

En donnant à x les valeurs 0 et l dans l'équation (8) on doit avoir $W = 0$, ce qui donne les conditions

$$B = 0, \quad \text{et} \quad \sin ml = 0,$$

d'où l'on déduit

$$ml = n\pi, \quad \text{ou} \quad m = \frac{n\pi}{l},$$

n étant un nombre entier quelconque positif ou négatif.

Il vient alors

$$W = Ae^{-\frac{n^2\pi^2\alpha^2}{l^2}t} \sin \frac{n\pi}{l} x,$$

et l'on obtiendra la solution du problème en faisant la somme de toutes les intégrales particulières de cette forme. Il suffit de donner à n des valeurs positives, car les solutions dans lesquelles n prend des valeurs égales et de signes contraires ne diffèrent que par le coefficient, de sorte qu'on peut les réunir. En désignant par A_n le coefficient qui convient à chaque valeur par-

ticulière de n, l'intégrale cherchée sera

$$(9) \qquad W = \sum_{n=0}^{n=\infty} A_n e^{-\frac{n^2\pi^2 a^2}{l^2} t} \sin\frac{n\pi}{l} x.$$

Pour déterminer les coefficients, nous remarquerons que, si $t = 0$, la valeur de W est égale à $-V'$, c'est-à-dire à une certaine fonction de x; posons

$$\sum_{n=0}^{n=\infty} A_n \sin\frac{n\pi}{l} x = -V' = \varphi(x).$$

Cherchons d'abord à évaluer l'intégrale définie

$$\int_0^l \varphi(y) \sin\frac{n'\pi y}{l}\, dy,$$

dans laquelle n' est un nombre entier positif. Cette intégrale se compose d'une somme de termes tels que

$$A_n \int_0^l \sin\frac{n\pi y}{l} \sin\frac{n'\pi y}{l}\, dy.$$

On vérifie aisément que chacun des termes où les nombres n et n' sont différents est nul; il ne reste donc que le terme dans lequel ces nombres sont égaux, ce qui donne

$$\int_0^l \varphi(y) \sin\frac{n'\pi y}{l}\, dy = A_{n'} \int_0^l \sin^2\frac{n'\pi y}{l}\, dy = A_{n'} \frac{l}{2}.$$

Ainsi l'on a, pour une valeur quelconque de n,

$$A_n = \frac{2}{l} \int_0^l \varphi(y) \sin\frac{n\pi y}{l}\, dy.$$

Si l'on remplace maintenant $\varphi(y)$, ou $-V'$, par sa valeur que donne l'équation (7), l'intégration ne présente pas de difficultés et l'on obtient

$$\int_0^l \varphi(y) \sin\frac{n\pi y}{l}\, dy = -\frac{n\pi l V_1}{n^2\pi^2 + \beta^2 l^2}.$$

Portant cette valeur dans l'expression de A_n, et celle-ci dans l'équation (9), il vient

$$W = -2\pi V_1 \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{n}{n^2\pi^2 + \beta^2 l^2} e^{-\frac{n^2\pi^2 a^2}{l^2} t} \sin\frac{n\pi}{l} x,$$

et enfin

$$U = -2\pi V_1 e^{-bt} \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{n}{n^2\pi^2 + \beta^2 l^2} e^{-\frac{n^2\pi^2\alpha^2}{l^2} t} \sin \frac{n\pi}{l} x.$$

Il suffit maintenant d'ajouter à cette expression la valeur du potentiel V', qui convient à l'état permanent, et l'on obtient pour le potentiel V relatif à l'état variable

$$(10) \qquad V = V_1 \frac{e^{\beta(l-x)} - e^{-\beta(l-x)}}{e^{\beta l} - e^{-\beta l}}$$

$$- 2\pi V_1 e^{-bt} \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{n}{n^2\pi^2 + \beta^2 l^2} e^{-\frac{n^2\pi^2\alpha^2}{l^2} t} \sin \frac{n\pi}{l} x.$$

Lorsque la déperdition par l'air est négligeable, les coefficients b et β sont nuls; il reste simplement

$$(11) \quad V = V_1 \frac{l-x}{l} - 2\pi V_1 \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{n\pi} e^{-\frac{n^2\pi^2\alpha^2}{l^2} t} \sin \frac{n\pi}{l} x.$$

La solution mathématique de ce problème avait été donnée par Laplace sous forme d'intégrale définie. Poisson (1) a indiqué cette solution en série en étudiant les lois de la propagation de la chaleur dans une barre conductrice.

959. **Courant dans un circuit fermé.** — Nous supposerons, pour simplifier, que le régime permanent est établi et que la déperdition par l'air ou le milieu ambiant de nature quelconque est négligeable.

Considérons, par exemple, un circuit thermoélectrique fermé, composé de deux fils A et B (fig. 281) de résistances a et b, soudés en deux points P et P' dont les températures sont T et T'. Soit V_a le potentiel du fil A sur la soudure P, V_a' le potentiel du même fil sur la soudure P', V_b et V_b' les potentiels des extrémités du fil B en P et en P'. Le courant étant le même dans les deux fils, on aura

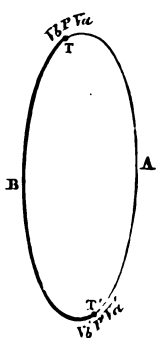


Fig. 281.

$$M = \frac{V_a - V_a'}{a} = \frac{V_b' - V_b}{b} = \frac{(V_a - V_b) - (V_a' - V_b')}{a+b}.$$

(1) *Journal de l'École polytechnique*, cah. XIX, p. 55.

$V_a - V_b$ est la différence des potentiels des deux fils A et B à la soudure P, et $V_a' - V_b'$ est la différence des potentiels des mêmes métaux à la soudure P'. Ces différences de potentiel, que nous représenterons par H et H', tiennent uniquement au contact des deux métaux et leurs valeurs sont des fonctions de la température. On a donc :

$$M = \frac{H - H'}{a + b} = \frac{E}{a + b};$$

le numérateur E est la *force électromotrice* du couple formé par les deux contacts. On peut écrire aussi :

$$M = \frac{(V_a - V_b) + (V_b' - V_a')}{a + b}.$$

Dans cette expression de l'intensité, le numérateur représente la somme des différences de potentiel que l'on rencontre au contact des métaux en parcourant le circuit dans une direction contraire à celle du courant.

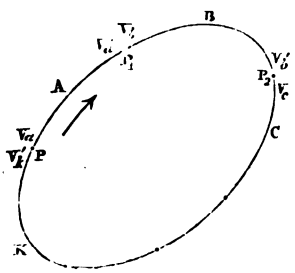


Fig. 282.

960. Sous cette forme la relation peut être plus facilement généralisée. Considérons un circuit composé d'un nombre quelconque de métaux A, B, C, D,... K (fig. 282), de résistances a, b, c, d,... k. Soient V_a et V_a' les valeurs des potentiels sur le métal A aux deux points de contact P et P_1, dans le sens suivant lequel marche le courant, V_b et V_b' les potentiels du métal B aux points P_1 et P_2, et ainsi de suite. L'intensité du courant sera

$$M = \frac{V_a - V_a'}{a} = \frac{V_b - V_b'}{b} = \frac{V_c - V_c'}{c} = \dots \frac{V_k - V_k'}{k},$$

d'où l'on déduit, en combinant par addition ces rapports égaux,

$$M = \frac{(V_a - V_k') + \dots + (V_c - V_b') + (V_b - V_a')}{a + b + c + \dots + k}.$$

Le numérateur de cette fraction représente encore la somme algébrique des différences de potentiel de tous les contacts que

l'on rencontre en parcourant le circuit dans une direction contraire à celle du courant ; c'est la force électromotrice du circuit total. Le dénominateur est la somme des résistances, ou la résistance totale du circuit.

Lorsque le circuit est entièrement métallique et tous les contacts à la même température, le numérateur est nul, d'après la loi de Volta, et le courant nul. On obtient en général un courant, si les soudures sont à des températures différentes.

Les mêmes formules conviennent également au cas où le circuit renferme des liquides quelconques, si l'on a soin de représenter les différentes couches liquides par les résistances correspondantes ; alors un courant peut exister sans qu'il y ait des différences de température aux points de contact.

Supposons, par exemple, que le circuit ne renferme qu'un couple, hydroélectrique ou thermoélectrique, dont la force électromotrice soit égale à E. La résistance intérieure du couple étant λ et la résistance du fil extérieur qui réunit les deux pôles λ', l'intensité du courant sera

$$M = \frac{E}{\lambda + \lambda'} = \frac{E}{\lambda'\left(1 + \frac{\lambda}{\lambda'}\right)}.$$

Si la résistance λ' du circuit est très-grande par rapport à celle du couple, ce qui a lieu souvent pour les éléments thermoélectriques, on voit que l'intensité du courant est en raison inverse de la résistance du circuit extérieur.

961. **Association des couples.** — Considérons un circuit renfermant n couples identiques dont chacun a une résistance intérieure λ et une force électromotrice E, la résistance du fil extérieur étant toujours λ'. La force électromotrice totale est alors égale à la somme des forces électromotrices de tous les couples, et la résistance de la pile égale à la somme des résistances des couples, ce qui donne pour l'intensité du courant

$$M = \frac{nE}{n\lambda + \lambda'} = \frac{E}{\lambda + \frac{\lambda'}{n}}.$$

Le courant a la même intensité que si l'on avait remplacé

le fil extérieur par un fil de résistance n fois plus faible. Si le rapport des résistances $\frac{\lambda'}{\lambda}$ est très-grand, l'intensité est à peu près n fois plus grande qu'avec un seul couple; c'est ce qui a lieu, par exemple, pour la pile de Melloni. Si, au contraire, ce rapport des résistances est très-petit, l'intensité est la même qu'avec un seul couple; ce serait le cas d'une pile de Volta dont les deux pôles seraient réunis par un fil métallique gros et court. Ce mode d'association des couples constitue ce qu'on appelle une *pile de tension*. On voit que c'est la disposition la plus avantageuse quand on se propose de vaincre une résistance extérieure considérable.

Supposons, au contraire, que tous les couples soient réunis par leurs pôles de mêmes noms et ceux-ci par un fil métallique extérieur. En désignant par V_1 et V_2 les potentiels des extrémités de ce fil sur les deux pôles, l'intensité du courant sera

$$M = \frac{V_1 - V_2}{\lambda'}.$$

D'autre part, l'intensité m du courant dans chacun des couples est égale au quotient de la somme algébrique des différences de potentiel par la résistance du couple, c'est-à-dire

$$m = \frac{V_2 + E - V_1}{\lambda}.$$

Le courant du fil extérieur étant la somme des n courants des différents couples, on a

$$M = nm,$$

ou

$$M = \frac{V_1 - V_2}{\lambda'} = \frac{E + V_2 - V_1}{\frac{\lambda}{n}} = \frac{E}{\lambda' + \frac{\lambda}{n}}.$$

L'intensité du courant est donc la même que si l'on avait remplacé tous les couples par un couple unique de résistance n fois plus faible et de même force électromotrice.

Cette disposition, que l'on appelle une *pile de quantité*, convient quand la résistance extérieure est très-faible par rapport à la ré-

sistance intérieure ; l'intensité du courant est alors à peu près n fois plus grande qu'avec un seul couple. Mais, si la résistance intérieure λ était très-grande, l'intensité serait sensiblement la même qu'avec un seul couple.

962. — **Dérivation des courants.** — La méthode d'Ohm permet également de déterminer l'intensité des courants dans les différentes parties d'un circuit dont les conducteurs, au lieu d'être ajoutés bout à bout, sont embranchés les uns aux autres d'une manière quelconque ; c'est le problème général dont le groupement des couples en quantité est un cas particulier. M. Kirchhoff a réduit tous les problèmes de ce genre à deux règles très-simples qu'il est facile d'établir :

1° Lorsque différents conducteurs aboutissent au même point, la somme algébrique des intensités des courants sur ces conducteurs, comptées à partir du point de rencontre, est nulle.

Si le courant est un flux d'électricité, comme nous l'avons considéré, il est clair que la quantité d'électricité située au voisinage du point de rencontre des conducteurs doit être invariable lorsque le régime permanent est établi et, par suite, que toute l'électricité qui afflue en ce point par certaines branches doit s'écouler par d'autres branches.

2° Dans un circuit fermé, auquel viennent se rattacher des conducteurs quelconques, la somme des produits de l'intensité du courant, dans chaque portion du circuit, par la résistance correspondante, est égale à la somme algébrique des tensions de contact.

Considérons, en effet, un circuit fermé composé de différents conducteurs A, B, C,... K, de résistances a, b, c.... k, chaque conducteur étant terminé, soit à un embranchement, soit au contact d'un autre conducteur de nature différente. En appelant V_a et V_a', V_b et V_b'..., les potentiels successifs des extrémités que l'on rencontre en parcourant le circuit dans un sens déterminé, m_a, m_b, m_c..., les intensités des courants dans les différents conducteurs, on a pour le premier

$$m_a = \frac{V_a - V_a'}{a},$$

ou

$$a\, m_a = V_a - V_a'.$$

Les autres conducteurs donnent, de même,

$$\begin{aligned} b\,m_b &= V_b - V_b', \\ &\vdots \qquad\quad \vdots \\ k\,m_k &= V_k - V_k'. \end{aligned}$$

En ajoutant toutes ces équations membre à membre, il vient

$$a\,m_a + b\,m_b + \ldots k\,m_k = (V_a - V_a') + (V_b - V_b') + \ldots (V_k - V_k').$$

Le second membre de cette équation représente la force électromotrice des différents contacts qui constituent le circuit considéré. Si ce circuit est métallique, par exemple, et à température constante, la force électromotrice est nulle ; alors la somme des produits des intensités partielles des courants par les résistances des conducteurs correspondants est nulle.

965. **Loi de Joule.** — S'il n'y avait pas de causes particulières tendant à ralentir le flux d'électricité qui s'écoule dans un fil, le mouvement serait uniformément accéléré, puisque les forces sont constantes, et l'intensité du courant augmenterait sans limite. On est donc obligé d'admettre qu'il y a dans les métaux des résistances, analogues au frottement, qui dépensent constamment le travail des forces motrices. Ces résistances se traduisent par un échauffement des conducteurs, et l'on peut considérer comme évident, toutes les fois qu'aucune autre forme de travail n'apparaît, telle qu'une désagrégation chimique, que la quantité de chaleur qui se produit dans un conducteur est proportionnelle au travail des forces électriques.

Or, la force qui s'exerce sur une masse m a pour expression $-m\dfrac{dV}{dx}$ et le travail élémentaire produit pendant un déplacement infiniment petit dx parallèle à la direction de la force est égal à $-m\dfrac{dV}{dx}dx$.

Dans un fil cylindrique, toutes les molécules d'une même tranche se meuvent parallèlement aux génératrices du cylindre, et le travail élémentaire pour le courant tout entier pendant l'unité de temps est $-M\dfrac{dV}{dx}dx$.

Le travail total $\mathfrak{T}$ dépensé pendant le même temps entre deux points dont les potentiels sont V_1 et V_2 a pour valeur

$$\mathfrak{T} = -M\int_{V_1}^{V_2}\frac{dV}{dx}\,dx = -M(V_2 - V_1) = M(V_1 - V_2).$$

En remplaçant la différence des potentiels par sa valeur en fonction de l'intensité du courant, il vient

$$\mathfrak{T} = M^2\lambda.$$

Ainsi le travail électrique pendant l'unité de temps, dans un fil conducteur traversé par un courant, est égal au produit du carré de l'intensité du courant par la résistance du fil. La quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au même produit; c'est la *loi de Joule*.

La quantité totale de chaleur Q dégagée dans toute l'étendue d'un circuit unique fermé sera donc, en désignant par A l'équivalent calorifique du travail, λ la résistance totale du circuit et E la force électromotrice,

$$Q = AM^2\lambda = A\frac{E^2}{\lambda}.$$

964. **Phénomène de Peltier.** — Considérons un circuit formé de deux fils métalliques A et B (fig. 281), de résistances a et b, soudés en deux points P et P′ dont les températures sont T et T′. Nous avons vu que l'intensité du courant, ou le flux d'électricité pendant l'unité de temps, est donnée par les formules

$$M = \frac{V_a - V_a'}{a} = \frac{V_b' - V_b}{b} = \frac{(V_a - V_b) - V_a' - V_b')}{a+b} = \frac{\Pi - \Pi'}{a+b};$$

la quantité de chaleur qui se dégage le long du circuit a pour expression

$$Q = AM^2(a+b).$$

Cette quantité de chaleur provient des phénomènes calorifiques qui se passent aux soudures. Sur la première, qui est à la température T, il se produit brusquement, ou du moins entre des points très-voisins, une élévation de niveau électrique $V_a - V_b = \Pi$, et

le travail nécessaire pour porter à ce niveau la masse électrique M est égal à MH ; la quantité de chaleur q absorbée à la source la plus chaude est donc

$$q = \mathrm{AMH}.$$

A l'autre soudure, le niveau électrique baisse brusquement de la hauteur H′ ; la masse M, qui tombe de cette hauteur, produit un travail MH′ et dégage une quantité q' de chaleur

$$q' = \mathrm{AMH}',$$

laquelle est absorbée par les réfrigérants qui maintiennent constante la température de cette soudure. La différence de ces deux quantités représente la chaleur qui reste dans le circuit et se distribue dans toute son étendue proportionnellement aux résistances ; on a donc

$$q - q' = \mathrm{Q},$$

d'où l'on déduit

$$\mathrm{AM}(\mathrm{H} - \mathrm{H}') = \mathrm{AM}^2(a + b);$$

cette formule n'est autre que la loi d'Ohm.

Il résulte de là une conséquence importante. On voit que la soudure P, à la température T, absorbe une quantité de chaleur q proportionnelle à l'intensité du courant qui la traverse et à la différence des potentiels H définie par la nature des soudures et la température, et cela quelle que soit l'origine du courant. Si la soudure n'est pas, comme dans le cas actuel, située dans un bain à température constante, elle empruntera cette chaleur aux corps voisins, en particulier aux métaux qui forment le contact. Si la quantité de chaleur absorbée est supérieure à celle que le courant dégage aux mêmes points en vertu de la loi de Joule, il s'y produira un abaissement de température. Comme l'une de ces quantités de chaleur est proportionnelle à l'intensité du courant et l'autre au carré de l'intensité, le refroidissement sera prédominant si le courant est faible, et il y aura un réchauffement pour des courants dont l'intensité dépassera une certaine valeur. Pour l'autre soudure P′, la résistance du conducteur et la chute de potentiel concourront pour produire toujours un dégagement de chaleur.

En résumé, quand une soudure est traversée par un courant, elle se refroidit ou s'échauffe (abstraction faite du dégagement de chaleur dû à la résistance du conducteur), suivant que la direction du courant est de même sens que celui que produirait l'échauffement direct de cette soudure, ou de sens opposé. Ce phénomène a été découvert par Peltier.

965. **Hypothèse de M. Clausius.** — On voit, d'après cela, qu'il y a une certaine analogie entre les phénomènes calorifiques qui se produisent dans un circuit formé de deux métaux, dont les soudures sont maintenues à des températures différentes T et T', et le jeu d'une machine à feu fonctionnant entre les mêmes limites de température. M. Clausius, partant de cette analogie, a voulu appliquer le théorème de Carnot aux quantités de chaleur dégagées ou absorbées aux deux soudures, comme à celles qui sont empruntées au foyer d'une machine et cédées au réfrigérant. On devrait avoir, d'après le théorème de Carnot,

$$\frac{q-q'}{q'}=\frac{\Pi-\Pi'}{\Pi'}=\frac{T-T'}{T'}$$

T et T' désignant les températures absolues des deux contacts, comptées à partir de — 273° centigrades au-dessous de zéro.

Il en résulterait, si l'on applique le théorème au cas de deux températures très-voisines,

$$\frac{d\Pi}{\Pi}=\frac{dT}{T},$$

d'où l'on déduit

$$\Pi=CT.$$

Si la tension de contact de deux métaux était proportionnelle à la température absolue, la différence des tensions $\Pi-\Pi'$ pour deux températures différentes, ou la force électromotrice d'un couple thermoélectrique, serait alors exactement proportionnelle à la différence des températures. Cette relation n'est vérifiée par expérience que dans des cas très-restreints; on peut donc en conclure que le théorème de Carnot n'est pas applicable aux courants thermoélectriques. D'ailleurs, ce théorème ne convient aux machines à feu elles-mêmes que si elles sont reversi-

bles, et les courants thermoélectriques ne présentent aucun caractère de reversibilité qui justifie le calcul de M. Clausius.

966. **Vérifications expérimentales. — État permanent.** — Pour ne pas interrompre la suite des raisonnements, nous avons indiqué toutes les lois théoriques avec les liens qui les rattachent, sans entrer dans le détail des vérifications expérimentales. Les lois relatives à l'intensité des courants, dans le cas le plus simple où le régime permanent est établi et où la déperdition par l'air est négligeable, ont été découvertes par Ohm lui-même en 1826, à l'aide d'expériences sur les courants fournis par les couples thermoélectriques, avant qu'il fût parvenu à en donner une théorie mathématique.

Fechner, en 1831 (1), vérifia les mêmes lois par l'emploi des piles hydroélectriques, mais ces travaux restaient ignorés et méconnus même en Allemagne. Peu de temps après, Pouillet (2) retrouva ces lois de son côté, sans avoir eu connaissance des recherches de ses devanciers.

La vérification des lois d'Ohm relatives à l'état permanent a été faite le plus souvent à l'aide du galvanomètre, et il serait trop long d'examiner ici les nombreux travaux publiés à ce sujet; nous nous bornerons à indiquer la méthode suivante employée par Pouillet. Pour établir la loi des longueurs, Pouillet se servait d'un couple Bismuth-Cuivre, dont il fermait le circuit par un fil de métal enroulé un certain nombre de fois sur le cadre d'un galvanomètre, et notait la déviation de l'aiguille. Doublant ensuite la longueur du fil, il doublait aussi le nombre des tours sur le cadre du galvanomètre et constatait la même déviation. Chacun des fils du cadre exerçait donc sur l'aiguille, dans le second cas, une action moitié moindre que dans le premier, et par conséquent l'intensité du courant était moitié moindre. La loi des sections se vérifiait de même en constatant que, pour obtenir une déviation constante avec un couple donné et des fils de même nature et de diamètres différents, il fallait que les longueurs des fils fussent proportionnelles à leurs sections. Enfin des expériences analogues permettent de déterminer le rapport des conductibilités de différents métaux.

(1) *Schweigger Journal*, t. LXIII, p. 249.
(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. IV, p. 267 (1837).

Cette question des conductibilités ou des résistances des métaux joue un grand rôle dans les applications des courants, en particulier pour la télégraphie électrique. A ce point de vue, le classement des métaux est à peu près le même que celui qui a été établi par M. Riess pour les décharges des batteries (419). Si les nombres obtenus par les deux méthodes ne sont pas tout à fait concordants, cela tient à ce que la détermination des résistances par les courants électriques comporte une grande précision, tandis que l'échauffement des fils par les décharges de batteries est un phénomène moins facile à observer et comporte plusieurs causes d'erreur à peu près inévitables. La concordance approchée des résultats suffit donc pour démontrer que les deux genres de phénomènes sont entièrement comparables.

967. **Expériences de M. Gaugain.** — M. Gaugain [1] a montré, en effet, que la décharge des corps électrisés, quand on l'effectue par un circuit assez résistant pour rendre le phénomène très-lent, suit exactement les lois d'Ohm, ce qui fournit un moyen très-simple et très-élégant de démontrer ces lois d'une manière complète, même dans le cas le plus général.

Considérons d'abord l'état permanent lorsque la déperdition par l'air est négligeable.

Pour démontrer la loi des longueurs et la loi des sections, par exemple, M. Gaugain emploie deux méthodes : celle des *durées d'écoulement* et celle des *décharges*.

Un électroscope à feuilles d'or est mis en communication avec le sol par un fil de coton. L'appareil est électrisé de façon que les pailles soient très-écartées et, lorsque l'écoulement a déjà duré assez longtemps pour que le fil soit électrisé d'une manière régulière, on observe le temps t nécessaire pour que la déviation des pailles passe d'une valeur à une autre, c'est-à-dire d'un potentiel déterminé V_1 à un autre potentiel V_2, ce qui correspond à l'écoulement d'une certaine quantité d'électricité M_1 ; l'intensité moyenne, c'est-à-dire la quantité qui s'écoule pendant l'unité de temps, est égale à $\frac{M_1}{t}$. Si l'on veut tenir compte de la déperdition, on supprime la communication du fil avec le sol et on observe

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LIX, p. 5; t. LX, p. 326, et t. LXIII, p. 261.

le temps T nécessaire pour obtenir la même chute de potentiel. La perte moyenne par l'air est donc égale à $\frac{M_1}{T}$, de sorte que l'intensité moyenne de l'écoulement par le fil est

$$M = \frac{M_1}{t} - \frac{M_1}{T} = M_1 \frac{T - t}{Tt} = \frac{M_1}{\theta};$$

θ représente le temps qu'aurait duré l'écoulement si les pertes par l'air eussent été nulles.

Avec deux fils de coton de 1^m65 de longueur pris dans une même bobine, M. Gaugain a obtenu

Avec le premier fil.	$t = 93''$;
Avec le second fil.	$94''$;
Avec les deux fils bout à bout.	$183''$.

La durée d'écoulement de la même quantité d'électricité par déperdition étant d'environ 2 heures, il en résulte

Pour le premier fil..	$\theta = 94'',2$;
Pour le second fil.	$95'',2$;
Pour les deux ensemble.	$187'',7$.

Le dernier résultat est aussi exactement que possible égal à la somme des deux autres.

968. La méthode n'est pas simplement approchée, comme on pourrait le croire d'après la forme du raisonnement. En effet, si le flux d'électricité est à chaque instant proportionnel au potentiel V de l'électroscope, comme on le verra plus loin, et en raison inverse de la résistance du fil λ, le flux dM pendant un temps dt sera, en désignant par C la capacité de l'électroscope,

$$dM = -CdV = \frac{V}{\lambda} dt,$$

d'où l'on déduit

$$\frac{dV}{V} = -\frac{t}{C\lambda} dt.$$

En intégrant cette équation entre les limites V_1 et V_2, il vient

$$t \cdot \frac{V_1}{V} = \frac{t}{C\lambda}.$$

La durée d'écoulement pour une chute de potentiel déterminée, abstraction faite de la perte par l'air, est donc proportionnelle à la résistance du fil, c'est-à-dire à sa longueur.

969. L'autre méthode consiste à mesurer la quantité d'électricité qui s'écoule pendant l'unité de temps à l'aide d'un électroscope à décharges. Pour cela, on maintient l'électroscope qui sert de source à un potentiel constant, soit en lui restituant de l'électricité de temps en temps, soit en le reliant avec un conducteur d'une très-grande capacité. Si la communication de cet appareil avec l'électroscope à décharges est établie successivement dans deux expériences avec des fils dont les longueurs soient entre elles comme 1 et 2, et si l'on compte le nombre des décharges qui correspondent à une même chute de potentiel, la déperdition par l'air est quatre fois aussi grande dans le second cas que dans le premier, parce que la surface est double et la durée de l'expérience double. On peut déduire de là la valeur de la déperdition et en tenir compte, s'il y a lieu, pour l'étude du flux d'électricité par deux fils d'inégales longueurs. Avec ces précautions, on constate alors que la quantité d'électricité qui s'écoule pendant l'unité de temps est en raison inverse de la longueur du fil.

Toutefois la comparaison du nombre des décharges n'est pas absolument correcte si la valeur moyenne du potentiel sur l'électroscope à décharges n'est pas négligeable par rapport au potentiel de l'autre extrémité du fil. Cette cause d'erreur n'est plus à craindre si l'on fait en sorte que l'électroscope à décharges ne soit employé qu'à comparer des flux égaux d'électricité; telle est, par exemple, l'expérience suivante qui est destinée à vérifier la loi des sections.

M. Gaugain prend dans une même bobine 4 fils de coton de $1^m,64$ chacun. Il s'assure d'abord que ces fils, placés dans les mêmes conditions entre un corps électrisé A et l'électroscope à décharges, transmettent sensiblement le même flux d'électricité. Il ajoute ensuite deux fils bout à bout, puis il établit deux communications simultanées entre le corps A et l'électroscope, au moyen de deux fils de $3^m,28$ de longueur, et détermine de nouveau le nombre des décharges pendant le même temps. Ce nombre doit être le même que pour chacun des fils primitifs sépa-

rément, puisque la longueur du fil et la section ont été doublées. La moyenne du nombre des décharges fournies par chaque fil isolément, pendant 3 minutes, a été 25,45, et les deux fils ajoutés ont donné sensiblement la même moyenne 25,50. La déperdition par l'air était négligeable.

M. Gaugain a constaté aussi que la loi des sections est indépendante de la forme du fil. Le flux d'électricité qui s'écoule par plusieurs fils parallèles est indépendant de la distance qui les sépare ; le flux obtenu avec un ruban de soie fut encore le même quand le ruban était développé ou replié d'une manière quelconque, pourvu que la longueur restât invariable.

970. Pour vérifier la loi des potentiels, on peut graduer un électroscope à feuilles d'or, comme le faisait de Saussure, par un autre électroscope identique. L'électroscope étant maintenu à un certain potentiel, on observe le nombre des décharges qu'il produit, pendant l'unité de temps, par l'intermédiaire d'un fil de coton; on porte ensuite l'électroscope à un potentiel moitié moindre et on y adapte deux fils de coton parallèles égaux au premier : le nombre des décharges doit être le même. M. Gaugain a obtenu, par exemple, 125 décharges pour la seconde expérience et 128,6 pour la première.

Quand on admet que le flux d'électricité qui s'écoule par un fil, dont l'une des extrémités communique avec le sol, est à chaque instant proportionnel au potentiel de l'autre extrémité, la durée d'écoulement d'une certaine quantité d'électricité est proportionnelle au logarithme du rapport du potentiel primitif au potentiel final (968). On peut déterminer par expérience le rapport des potentiels, de manière à comparer les deux résultats. Considérons un électroscope A dont la capacité électrique est C et le potentiel V ; on le touche avec un conducteur B dont la capacité est C′, le nouveau potentiel V′ est donné par l'équation

$$(C+C')\,V'=CV,$$

d'où l'on tire

$$V'=\frac{C}{C+C'}\,V=\frac{V}{\beta}.$$

On enlève ensuite le conducteur B, on le ramène à l'état neutre

et l'on recommence la même opération; le potentiel de l'électroscope devient alors

$$V'' = \frac{V'}{\beta} = \frac{V}{\beta^2}.$$

Après n opérations semblables on aura donc, en appelant V_1 le potentiel initial et V_2 le potentiel final,

$$V_2 = \frac{V_1}{\beta^n};$$

on en déduit

$$n = \frac{1}{l.\beta} l.\left(\frac{V_1}{V_2}\right).$$

Si, avec le même électroscope, on mesure d'une part les durées d'écoulement t et, d'autre part, le nombre n des contacts nécessaires pour amener la même chute de potentiel, le rapport de ces deux quantités devra être constant pour un même fil. Voici quelques expériences de M. Gaugain :

DÉVIATIONS EXTRÊMES DE L'ÉLECTROSCOPE	NOMBRE DES CONTACTS n	DURÉE D'ÉCOULEMENT t	RAPPORT $\frac{t}{n}$
25° — 19°	54	37″,6	1,10
19° — 15°	25	25	1,09
15° — 10°	62,5	71,5	1,14

971. L'emploi des fils de coton permet également de déterminer la distribution des potentiels. M. Gaugain a pris deux électroscopes à feuilles d'or parfaitement identiques; l'un deux A a été mis en communication avec le sol par un fil de coton de 5 mètres de longueur, puis l'autre B en communication avec le premier par un nouveau fil de 5 mètres. Le second électroscope B étant électrisé de manière que la divergence des feuilles fût de 25°, il a été maintenu dans cet état pendant un quart d'heure, pour que l'on fût certain d'avoir établi le régime per-

manent; au bout de ce temps, la divergence des feuilles du premier électroscope A était de 14°. Cela fait, les fils de coton furent supprimés, l'électroscope B fut électrisé de nouveau jusqu'à la divergence de 25°, puis mis en communication par un fil métallique de capacité très-faible avec l'électroscope A à l'état neutre. Après le partage, l'écartement des feuilles d'or de l'électroscope A se trouva encore de 14°. Il en résulte que, le long d'un fil de coton homogène par lequel on met un corps électrisé en communication avec le sol, les potentiels varient en progression arithmétique lorsque le régime permanent est atteint.

M. Latimer Clark (1) a indiqué un moyen assez simple de vérifier cette distribution des potentiels dans le cas des piles électriques. Une pile puissante P (fig. 283) communique avec le sol par son pôle négatif, par exemple; le pôle positif communique aussi avec le sol, mais par un fil métallique AB de grande résistance. Un couple Daniell C communique encore avec le sol par son pôle négatif, et le pôle positif est relié par l'intermédiaire d'un galvanomètre G avec un point M du fil AB, tel que le courant dans le galvanomètre soit nul. Cette condition est réalisée lorsque le potentiel produit en M par la pile principale est égal à la force électromotrice du couple Daniell. On met ensuite deux couples de Daniell en tension sur le second circuit, puis on établit la communication sur le fil AB en un point M', tel que M'B = 2MB, et l'on constate que le courant est encore nul. Pour trois couples Daniell, il faut de même une distance égale à 3MB entre le point de contact et le sol, et ainsi de suite. Le long du fil AB, les potentiels diminuent donc en progression arithmétique, comme l'indique la loi d'Ohm.

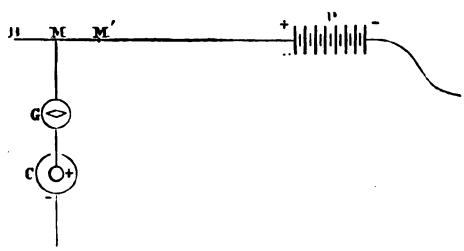


Fig. 283.

972. Il résulte de toutes ces expériences que la décharge d'un corps électrisé, par l'intermédiaire d'un fil de coton ou

(1) *Journal de Physique*, t. I, p. 367.

d'un conducteur médiocre quelconque, comme une baguette de gomme laque, de porcelaine, de tourmaline, des rubans de soie ou des colonnes d'huile, etc., obéit aux lois d'Ohm et représente exactement le phénomène qui a lieu dans les courants électriques.

On peut ainsi démontrer ces lois dans un cours d'une manière très-simple. Une batterie de grande surface étant électrisée, on met l'armature intérieure en communication avec un électroscope à décharges par 4 fils de coton parallèles aussi identiques que possible. Si les fils sont assez longs, l'écoulement d'électricité sera très-faible et le potentiel de la batterie pourra être considéré comme sensiblement constant. On détermine le nombre des décharges pendant l'unité de temps, puis on coupe un des fils et l'on observe de nouveau le nombre des décharges; on en coupe ensuite un second, puis un troisième : on constate que le produit du nombre des décharges pendant l'unité de temps par le nombre des fils qui restent est sensiblement constant, ce qui vérifie la loi des sections. La valeur moyenne du potentiel sur l'électroscope n'est pas constante, mais cette cause d'erreur peut être rendue négligeable, si l'on a soin que le potentiel de la batterie soit toujours beaucoup plus élevé que celui de l'électroscope.

On vérifiera de même la distribution des potentiels et la loi des longueurs. Pour cela, on met l'armature d'une batterie électrisée en communication avec le sol par une corde de 2 ou 3 millimètres de diamètre et de 4 ou 5 mètres de longueur. Cette corde est divisée en un certain nombre de parties égales, 6 par exemple, par des traits que nous désignerons par les numéros 1, 2, 3, 4, 5 et 6, ce dernier étant à l'extrémité qui touche le sol. On suspend aux différents points de repère des doubles pendules de même longueur et à peu près de même poids; tous ces pendules divergent, excepté le dernier, et l'angle d'écart est d'autant plus grand qu'on se rapproche davantage de la batterie. Quand on touche avec la main un point quelconque de la corde, tous les pendules situés entre la main et le sol redeviennent verticaux. Cette expérience donne une idée frappante de la diminution régulière des potentiels; si l'on voulait faire des mesures exactes, il suffirait de mettre ces différents points

de repère en communication avec un électromètre quelconque par un fil conducteur.

On peut encore isoler l'extrémité de la corde qui touchait le sol, et mettre successivement les différents points de repère en communication par un fil de métal avec un électroscope à décharges. On vérifie alors que le nombre des décharges, pendant l'unité de temps, est sensiblement en raison inverse de la distance du point touché à la batterie.

973. Nous avons vu (954) que la densité électrique sur le périmètre de la section d'un fil est sensiblement proportionnelle au potentiel correspondant, surtout dans le cas où les potentiels varient en progression arithmétique. On voit aisément qu'alors la densité moyenne dans toute la longueur d'un fil cylindrique est la même que pour le point milieu. Si le potentiel est nul à l'une des extrémités, cette densité moyenne est la moitié de celle qui correspond à l'autre extrémité. La quantité d'électricité libre qui se trouve répandue sur un fil par lequel se produit un écoulement d'électricité, ou la *charge dynamique*, est donc la moitié de celle qui serait nécessaire pour porter le fil tout entier au potentiel le plus élevé, ce qu'on peut appeler la *charge statique*. Pour vérifier cette relation, il suffit de mettre un fil de coton isolé en communication avec un électroscope, puis de supprimer cette communication et de mesurer par un électroscope à décharges la quantité d'électricité que possède le fil, ce qui donne la charge statique. L'électroscope qui sert de source étant maintenu au même potentiel et communiquant par le même fil avec l'appareil à décharges, on supprime à un certain moment la source et l'on compte le nombre de décharges qui restent à s'écouler : on a ainsi la charge dynamique du fil. M. Gaugain a obtenu, par exemple, 11 décharges dans le premier cas et 5,4 dans le second.

Il a constaté aussi que la charge dynamique est absolument indépendante de la section du fil et ne dépend que de la surface. Il a fait, pour cela, des expériences avec un sac cylindrique formé par un ruban de soie dont les deux bords avaient été cousus. Ce sac était vide dans une première expérience et, dans une seconde, il était rempli par deux autres sacs semblables. Quoique le flux d'électricité fût très-différent dans les deux cas, puisqu'il était

proportionnel à la section, la charge dynamique est restée sensiblement la même.

NATURE DU CONDUCTEUR	CHARGE DYNAMIQUE	FLUX D'ÉLECTRICITÉ
Sac vide	7,14	17
Sac plein (triple)	7,40	$51 = 3 \times 17$

C'est l'une des expériences les plus nettes d'où l'on puisse conclure que, dans le phénomène des courants, il n'y a d'électricité libre qu'à la surface des conducteurs.

974. M. Gaugain a cherché encore, par la même méthode, comment varie le coefficient de charge statique d'un fil, c'est-à-dire la capacité électrique de l'unité de longueur, en fonction du diamètre (1); l'expérience a été faite avec des fils de fer en usage pour les télégraphes. La capacité d'un pareil fil dépend beaucoup des dimensions, de la forme et de la distance des conducteurs qui l'entourent, mais il est probable que dans les expériences de M. Gaugain ces fils étaient substitués les uns aux autres dans la même position, au-dessus d'une table à expériences; on peut donc les considérer comme ayant été placés à la même distance d'un plan indéfini. Dans ce cas (177), la capacité électrique γ de l'unité de longueur d'un fil de rayon R situé à la distance δ du plan est donnée par la formule

$$\frac{1}{\gamma} = l.\frac{2\delta}{R}.$$

Si l'on désigne par A et B deux constantes et par d le diamètre du fil, les capacités γ déterminées par M. Gaugain doivent donc satisfaire à l'équation

$$\frac{B}{\gamma} = log\frac{A}{d} = log\,A - log\,d.$$

On obtient ainsi, en calculant les constantes A et B par les expériences extrêmes,

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LI, p. 638.

DIAMÈTRE DU FIL	CAPACITÉ	
	OBSERVÉE	CALCULÉE
1mm.	100	»
2	113	114
3	125	124,7
4	133	133,4
5	141	»

975. Il reste enfin à étudier l'état permanent quand les pertes par l'air ne sont pas négligeables.

D'après la formule (7) du n° 957, le potentiel V_0 au milieu d'un fil, dont l'une des extrémités communique avec le sol et dont l'autre est au potentiel V_1, a pour expression

$$(1) \qquad V_0 = V_1 \frac{e^{\frac{\beta l}{2}} - e^{-\frac{\beta l}{2}}}{e^{\beta l} - e^{-\beta l}} = \frac{V_1}{e^{\frac{\beta l}{2}} + e^{-\frac{\beta l}{2}}} = \frac{V_1}{y + \frac{1}{y}},$$

en posant

$$(2) \qquad y = e^{\frac{\beta l}{2}}.$$

Si les potentiels sont connus, on en déduit pour y, en ne prenant que la racine positive, laquelle est la seule admissible,

$$(3) \qquad y = \frac{V_1}{2V_0} + \sqrt{\frac{V_1^2}{4V_0^2} - 1}.$$

On peut, dans deux expériences successives avec des fils de même nature et de longueurs différentes, déterminer le rapport qui existe entre le potentiel V_0 au milieu du fil et le potentiel V_1 à l'extrémité; on aura ainsi, par les équations (3) et (2), deux moyens de calculer la valeur du coefficient β, et la concordance des résultats sera une vérification des formules.

M. Gaugain a opéré de cette manière sur deux cordonnets de soie bien homogènes dont les longueurs étaient 4 et 8 mètres. La conductibilité de ces cordonnets était tellement faible, qu'il fallait plus d'une demi-heure pour que le potentiel au milieu du

fil de 8 mètres cessât de croître d'une manière appréciable. Le potentiel de la source étant représenté par 52, les potentiels de points milieux ont été 18,7 pour le fil de 4 mètres et 9 pour le fil de 8 mètres, tandis que, si l'influence de l'air eût été négligeable, le potentiel du point milieu eût été représenté par 26 dans les deux cas.

En prenant pour unité la longueur (4 mètres) du fil le plus court, on déduit de la première expérience $e^{\frac{\beta}{2}} = 2{,}355$. Si l'on calcule, d'après cela, le potentiel au milieu du fil le plus long, on trouve 9,08 au lieu de 9 qu'a donné l'observation directe.

Dans ce cas, l'intensité du courant est exprimée par la formule

$$M = -cs\frac{dV}{dx} = cs\beta V_1 \frac{e^{\beta(l-x)} + e^{-\beta(l-x)}}{e^{\beta l} - e^{-\beta l}}.$$

Si l'on déterminait expérimentalement les valeurs de l'intensité en deux points, on aurait encore une autre manière de calculer le coefficient β et de vérifier la théorie.

976. **État variable.** — Les problèmes relatifs à l'état variable présentent de grandes difficultés, tant au point de vue expérimental qu'au point de vue théorique. Un des plus simples que l'on puisse se poser est celui-ci : un conducteur cylindrique et homogène de dimensions données étant mis en communication, d'une part avec le sol et, d'autre part, avec une source d'électricité constante dont le potentiel est connu, déterminer le temps qui s'écoule jusqu'au moment où le potentiel en un point du conducteur prendra une valeur déterminée. On pourra appeler *durée de propagation* l'intervalle de temps ainsi défini.

Le problème peut être subdivisé en deux autres. On peut demander que ce potentiel atteigne une valeur absolue déterminée, ou une fraction déterminée du potentiel limite qui convient au même point dans l'état permanent. Il y a donc lieu de considérer deux durées de propagation, l'une *absolue* et l'autre *relative* ; cette dernière sera le temps nécessaire pour atteindre une fraction déterminée du potentiel limite.

M. Gaugain a étudié ce phénomène sur des fils de coton, ou sur des colonnes d'huile, par des méthodes analogues à celles que nous avons déjà indiquées. Dans le cas le plus simple où les

déperditions par l'air sont négligeables, il a constaté que la durée de propagation, absolue ou relative, est *en raison inverse du coefficient de conductibilité et de la section du conducteur, proportionnelle au carré de la longueur et au coefficient de charge.*

Si donc on représente par A un coefficient constant, la durée de propagation, absolue ou relative, peut être exprimée par la formule

$$t = A\frac{\gamma l^2}{cs},$$

dans laquelle les différentes lettres ont les significations que nous leur avons données plus haut (955). Ces résultats sont parfaitement d'accord avec la théorie d'Ohm. En effet, la formule (11) du n° 958 montre que la valeur du potentiel en un point reste la même dans différentes expériences lorsque le seul facteur qui renferme le temps atteint la même valeur. Si donc l'expérience est réalisée dans des conditions telles que l'on ait $\frac{\alpha^2 t}{l^2} = A$, le potentiel sera le même.

On en déduit, en remplaçant α^2 par sa valeur $\frac{cs}{\gamma}$,

$$t = A\frac{\gamma l^2}{cs}.$$

L'expérience montre encore que la durée de propagation relative est indépendante du potentiel de la source; cela résulte aussi de la formule d'Ohm, puisque la valeur de U et celle du potentiel limite sont toutes deux proportionnelles au potentiel de la source. Il n'en est pas de même pour la durée de propagation absolue; la formule montre que le problème est alors beaucoup plus complexe.

Si la déperdition par l'air n'est pas négligeable, on voit immédiatement que la durée de propagation, absolue ou relative, doit être augmentée, et il est facile de montrer aussi qu'elle croît plus rapidement, toutes choses égales d'ailleurs, que le coefficient de charge et le carré de la longueur du fil.

977. Ces résultats peuvent être généralisés et appliqués, par exemple, à toutes les expériences dans lesquelles on a utilisé les

fils télégraphiques pour déterminer la *vitesse de propagation de l'électricité*. Si l'on entend par là le temps nécessaire pour que le fil atteigne son état limite, ce temps est infini en théorie. Si on le détermine, en pratique, par la condition que le potentiel en un point ne diffère pas sensiblement du potentiel limite, la valeur obtenue dépendra de la précision avec laquelle on évaluera la différence des deux potentiels, ou l'intensité du courant, et l'on pourra obtenir des durées extrêmement différentes, suivant le degré d'approximation auquel on s'arrêtera. Enfin, la durée de propagation n'est pas mieux définie si l'on observe le moment où l'électricité devient appréciable au point considéré, par le courant ou par le potentiel, parce que l'apparition de l'électricité semblera plus ou moins rapide, suivant le procédé à l'aide duquel on appréciera l'état électrique du fil.

La question se complique encore davantage si le fil éprouve des déperditions, soit par le contact de l'air, soit par une suite de dérivations qui s'effectuent dans toute sa longueur, comme celles que produisent les poteaux d'un fil télégraphique aérien, soit par un milieu ambiant autre que l'air, comme pour les fils souterrains ou les câbles plongés dans la mer. Dans ce dernier cas, en particulier, les fils sont entourés d'un milieu parfaitement conducteur dont ils ne sont séparés que par une couche isolante de faible épaisseur ; le coefficient de charge est alors très-grand, la déperdition est loin d'être négligeable et la propagation doit, en général, paraître beaucoup plus lente.

Le problème de la vitesse de propagation de l'électricité, que l'on s'est proposé souvent de résoudre par expérience, n'est donc pas défini d'une manière simple, comme pour le son ou la lumière. D'après la théorie d'Ohm et les recherches de M. Gaugain, il n'y a pas lieu de s'étonner des divergences considérables que présentent les résultats obtenus par différents observateurs (444), parce que les conditions dans lesquelles ils se sont placés n'étaient pas directement comparables.

978. **Relations qui existent entre les théorèmes d'électricité statique et les lois de propagation des courants.** — Nous avons vu (243-251) qu'il existe des relations très-simples entre les lois de propagation de la chaleur, par conductibilité, et les lois de distribution des forces électriques dans un milieu isolant. Comme

la propagation de l'électricité dans un milieu conducteur repose sur les mêmes lois fondamentales que la propagation de la chaleur par conductibilité, il en résulte aussi que la propagation de l'électricité et la distribution des forces dans le problème correspondant d'électricité statique doivent présenter les mêmes corrélations. Considérons des corps A_1, A_2, A_3... maintenus à des potentiels constants V_1, V_2, V_3...; supposons deux expériences dans lesquelles ces corps soient séparés d'abord par un milieu conducteur de l'électricité, puis par un milieu isolant. La distribution des potentiels dans le milieu intermédiaire est exactement la même dans les deux cas. Dans le premier, le flux d'électricité est normal à chacun des corps considérés A_1, A_2, A_3..., et reste normal à toutes les surfaces de niveau intermédiaires; la quantité qui s'écoule par un élément de surface de l'un de ces corps rentre dans un autre corps par un élément correspondant de surface. Dans le second cas, la force électrique est normale en chaque point de la surface des conducteurs A_1, A_2, A_3...; les lignes de force sont des orthogonales aux surfaces de niveau situées dans le milieu isolant, et les quantités d'électricité répandues sur deux éléments correspondants sont égales et de signes contraires. En résumé, les forces dans le problème d'électricité statique varient exactement suivant les mêmes lois que les flux d'électricité dans le problème corrélatif.

Considérons, en particulier, les deux armatures A et B d'un condensateur fermé, maintenues aux potentiels V_1 et V_2. La force électrique, sur un élément de surface de l'armature intérieure A, est proportionnelle à la densité correspondante (161); la somme des forces est donc proportionnelle à la charge totale M. Cette charge totale M est proportionnelle à la différence des deux potentiels $V_1 - V_2$, et à une fonction φ qui dépend de la forme et de la distance des deux armatures. D'autre part, si les armatures A et B sont maintenues aux mêmes potentiels et séparées par un milieu conducteur, il s'écoulera de l'une à l'autre une quantité d'électricité proportionnelle à la somme des forces considérées, c'est-à-dire à la charge M du condensateur et à la même fonction φ. Le flux électrique et la charge du condensateur sont donc dans un rapport constant.

979. M. Gaugain a trouvé, par expérience, que les mêmes lois

mathématiques régissent les deux ordres de phénomènes. Il a montré d'abord que, dans les condensateurs formés de sphères et de cylindres concentriques (363—373), la charge électrique varie exactement suivant les lois que l'on peut établir facilement pour la propagation des courants. Il a pris ensuite des condensateurs cylindriques excentriques, et il a déterminé sur des appareils qui avaient les mêmes rayons et la même excentricité : 1° la charge électrique quand les armatures sont séparées par une couche d'air ; 2° le flux d'électricité, évalué par un électroscope à décharges, qui s'écoule d'une armature à l'autre quand on remplit l'intervalle avec de l'huile d'olive ; 3° la résistance de la couche liquide formée en remplissant cet intervalle par une dissolution de sulfate de cuivre. Comme l'intensité du courant entre deux points d'un circuit est en raison inverse de la résistance du milieu qui les sépare, les inverses des résistances ainsi déterminées étaient proportionnels aux flux d'électricité que l'on aurait obtenus en maintenant les deux armatures à des potentiels constants. Enfin, le calcul de la distribution ou du flux d'électricité dans le cas de deux cylindres excentriques ayant été effectué par M. Blavier (176), on pouvait ensuite comparer l'expérience avec la théorie.

Voici les résultats obtenus avec des cylindres dont les diamètres étaient de 10 et de 80 millimètres :

DISTANCE DES AXES EN MILLIMÈTRES	CHARGE ÉLECTRIQUE	FLUX TRANSMIS PAR		VALEURS CALCULÉES
		L'HUILE D'OLIVE	LE SULFATE DE CUIVRE	
0	1000	1000	1000	1000
17,5	1137	1145	1111	1127
20	1155	1172	1162	1169
23	1241	1283	1232	1250
25	1310	1379	1319	1350
27	1482	1504	1470	1479
30	1724	1755	1714	1729

Les mêmes relations ont été vérifiées par M. Gaugain pour le cas de deux plateaux parallèles maintenus à des distances dif-

férentes. Il résulte encore de là une conséquence importante, c'est que les lois de la propagation de l'électricité dans les corps très-mauvais conducteurs comme l'huile d'olive et, à plus forte raison, les fils de coton, sont les mêmes que pour les conducteurs ordinaires; les méthodes employées par M. Gaugain, pour la vérification des lois d'Ohm et l'étude de la propagation, se trouvent ainsi justifiées de nouveau.

980. **Phénomènes calorifiques.** — Les lois relatives à la chaleur dégagée par les courants dans les conducteurs sont identiques à celles que M. Riess a découvertes (407 et suiv.) pour les décharges de batteries ; mais on peut les vérifier dans le cas actuel avec une précision beaucoup plus grande, parce que la mesure de l'intensité des courants et de la résistance des conducteurs comporte plus d'exactitude et que l'on peut disposer d'une quantité de chaleur quelconque en prolongeant la durée des expériences. M. Joule [1] faisait passer un courant, dont l'intensité était mesurée au moyen d'une boussole des tangentes, par un fil de cuivre plongé dans un calorimètre contenant une certaine quantité d'eau, et comparait la quantité de chaleur dégagée pendant un certain temps à la valeur moyenne de l'intensité. Remplaçant ensuite le fil de cuivre par un fil de fer et une colonne de mercure, il a constaté que la quantité de chaleur dégagée pendant le même temps est proportionnelle à la résistance du conducteur et au carré de l'intensité du courant.

M. Ed. Becquerel [2] a vérifié peu de temps après la loi de Joule, en mesurant les intensités des courants par la décomposition de l'eau, et en apportant plus d'exactitude dans la détermination des quantités de chaleur. M. Ed. Becquerel a constaté aussi qu'il en est de même pour les liquides. « Dans la décomposition « de l'eau, par exemple, si l'on ajoute, à la chaleur dégagée « dans le liquide par le passage du courant, celle qui serait « produite par la recomposition de l'eau formée à l'aide des gaz « dégagés aux deux pôles, on a des nombres qui sont propor- « tionnels aux résistances à la conductibilité, et en raison di- « recte des carrés de la quantité d'électricité qui passe dans un « temps donné. »

(1) *Phil. mag.*, t. XIX, p. 260 (1841). — *Archives de l'électricité*, t. II, p. 54.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. IX, p. 21.

Nous n'insisterons pas davantage sur la loi de Joule, qui a été vérifiée par diverses méthodes très-ingénieuses et dont on a fait des applications importantes, mais nous étudierons plus particulièrement le phénomène découvert par Peltier.

981. Les expériences de Peltier relatives aux variations de température des soudures sous l'influence des courants, ont été faites avec la pince thermoélectrique décrite plus haute (949).

Peltier (1) fit passer d'abord un courant à travers un conducteur formé de fils de fer, de zinc et de cuivre portant deux soudures, l'une A entre le fer et le zinc, l'autre B entre le zinc et le cuivre. La pince étant appliquée sur la soudure A, le galvanomètre avec lequel elle communiquait indiqua une déviation de + 30°, quand le courant extérieur allait du fer au zinc à travers la soudure, et de + 15° seulement quand le même courant marchait en sens contraire. A la soudure B, le courant allant du zinc au cuivre produisait un échauffement correspondant à une déviation de + 26°, et la déviation n'était plus que de + 14° pour une direction opposée du courant.

Peltier attribuait ces variations dans le dégagement de chaleur à la cristallisation des métaux, et il obtint en effet des différences plus grandes avec le bismuth. D'autre part, les résultats varient avec l'intensité du courant qui traverse la soudure, comme on le voit par le tableau suivant des expériences faites sur une soudure de bismuth et cuivre.

DÉVIATION GALVANOMÉTRIQUE DU COURANT QUI TRAVERSE LA SOUDURE	ÉCHAUFFEMENT DE LA PINCE ÉVALUÉ PAR LA DÉVIATION D'UN AUTRE GALVANOMÈTRE	
	COURANT DU BISMUTH AU CUIVRE	COURANT DU CUIVRE AU BISMUTH
15°	— 2°,5	+ 10°
20	— 4,5	»
28	— 4,5	»
30	0	»
35	+ 4	+ 50

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. LVI, p. 371.

On voit que, si le courant passe dans le sens suivant lequel se produit au contact une élévation du niveau électrique, il y a un refroidissement pour des courants de faible intensité, puis un échauffement pour des intensités plus grandes, à partir du moment où le dégagement de chaleur qui correspond à la loi de Joule devient prédominant.

Peltier a obtenu des différences plus grandes encore avec le bismuth et l'antimoine. Dans une de ces expériences, il employait deux barreaux de bismuth B*i* et B*i'* (fig. 284), séparés par un barreau d'antimoine S*b*, et soudés à des fils de cuivre C*u*, C*u'*. En faisant traverser ce fil par un courant de A en D, les deux soudures cuivre-bismuth et antimoine-bismuth, c'est-à-dire A et C s'échauffaient, les deux autres B et D se refroidissaient, et il y avait en outre un échauffement général dû à la résistance du conducteur. En choisissant convenablement l'intensité du courant, on obtenait deux maxima de température en A et en C, deux minima en B et D, et, par suite, trois points intermédiaires M, M' et M'' où la variation de température

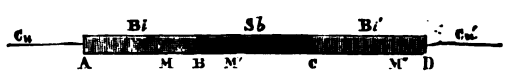


Fig. 284.

était nulle, sans compter un quatrième point neutre situé sur le fil de cuivre.

La pince thermoélectrique n'est jamais en contact bien intime avec la soudure qu'on explore; les effets sont beaucoup plus sensibles quand on réunit en croix par une nouvelle soudure deux soudures de métaux différents, platine et fer par exemple; l'une d'elles est traversée par le courant et l'autre sert de pince thermoélectrique.

Il n'est pas nécessaire, d'ailleurs, d'avoir recours à un instrument thermoélectrique pour montrer ce refroidissement des soudures. Peltier enferme, par exemple, une soudure bismuth-antimoine dans le réservoir d'une sorte de thermomètre à air qui communique par un tube vertical avec un vase renfermant un liquide. On note le niveau du liquide quand la soudure n'est traversée par aucun courant, puis on constate un abaissement

ou une élévation de la colonne liquide lorsqu'on fait passer à travers la soudure, dans un sens ou dans l'autre, un courant d'une intensité convenable.

982. Ce phénomène de Peltier, un peu négligé d'abord, a été depuis l'objet d'un assez grand nombre de travaux. Lenz [1] a indiqué, pour le mettre en évidence, un procédé très-ingénieux: une soudure bismuth-antimoine est placée dans de l'eau qui contient une petite quantité de glace en suspension, de manière que la température du liquide soit très-voisine de zéro; en faisant traverser la soudure par un courant de faible intensité allant du bismuth à l'antimoine, on provoque la formation d'une couche de glace autour de la soudure.

M. Ed. Becquerel [2] a fait remarquer le premier que le refroidissement d'une soudure n'a lieu que si le sens du courant est le même que celui que produirait l'échauffement de la soudure, ce qui est d'accord avec la théorie du phénomène.

Enfin Quintus Icilius [3] a démontré par expérience que l'effet calorifique, échauffement ou refroidissement, est proportionnel à l'intensité du courant qui traverse la soudure. Pour cela, il faisait passer un courant pendant un certain temps dans un circuit renfermant une pile thermo-électrique de 32 couples bismuth et antimoine; puis, à l'aide d'un commutateur, il faisait communiquer cette pile avec un galvanomètre. Le courant primitif échauffait le circuit tout entier et dégageait, en vertu de la loi de Joule, une même quantité de chaleur sur toutes les soudures; mais, d'après le phénomène de Peltier, toutes les soudures d'un certain sens éprouvaient en outre une certaine élévation de température, et les soudures de sens contraire un refroidissement. Le courant secondaire, indiqué par le galvanomètre, correspondait donc exactement au phénomène de Peltier, indépendamment de l'échauffement général du circuit. Or l'intensité du courant secondaire fut toujours proportionnelle à l'intensité du courant principal, d'où il résulte que le dégagement et l'absorption de chaleur sur chaque soudure, indépen-

(1) *Pogg. Annal.*, t. XLIV, p. 342.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XX, p. 55.
(3) *Pogg. Annal.*, t. LXXXIX, p. 377. — *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXXIX, p. 249.

damment de la loi de Joule, sont proportionnels à l'intensité du courant qui les traverse.

983. M. Edlung (1) a cherché à montrer que l'effet Peltier est proportionnel à la force électromotrice, entre deux températures déterminées, des métaux qui forment la soudure. La soudure était enfermée dans un thermomètre à air et l'on mesurait la différence des niveaux auxquels la colonne liquide se maintenait en équilibre quand on faisait passer un même courant dans les deux sens. Dans le cas d'échauffement, il se produit sur la soudure une quantité de chaleur AMH, puis, sur la partie des barreaux renfermée dans la boule et dont la résistance est λ, une quantité de chaleur $AM^2\lambda$. Il y a équilibre lorsque le thermomètre perd par rayonnement une quantité égale, c'est-à-dire lorsque l'excès de la température du thermomètre sur celle de l'air ambiant, ou l'abaissement h de la colonne liquide, est proportionnel à cette même quantité de chaleur. On a donc

$$Kh = AMH + AM^2\lambda.$$

Quand le sens du courant est renversé, l'effet Peltier change de signe, et l'abaissement h' de la colonne liquide est alors

$$Kh' = -AMH + AM^2\lambda,$$

ce qui donne

$$K(h - h') = 2AMH.$$

Ainsi la différence des niveaux du liquide est proportionnelle à la quantité de chaleur absorbée ou dégagée à la soudure. Voici quelques expériences :

NATURE DES SOUDURES	DIFFÉRENCE DU NIVEAU $h - h'$	QUANTITÉS PROPORTIONNELLES	FORCES ÉLECTROMOTRICES ENTRE 0° ET 10°
Cuivre — fer. . .	17,85	24,95	24,95
Platine — Cuivre..	7,57	10,50	8,23
Maillechort — Cuivre	15,57	21,77	25,18
Bismuth — Cuivre.	141,50	197,60	92,97

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XVIII, p. 463 et t. XXIII, p. 359.

Les trois premiers nombres vérifient assez bien la loi de proportionnalité entre l'effet Peltier et la force électromotrice du couple correspondant à la soudure, mais la discordance pour le résultat relatif au couple Bismuth-Cuivre est manifeste. La théorie indique d'ailleurs que cette relation ne doit pas être générale. En effet, la force électromotrice E d'un couple entre deux températures T et T′ est égale à la différence des tensions de contact Π et Π′ relatives à ces deux températures. La quantité de chaleur Q absorbée à la première soudure étant égale à AMΠ, on peut écrire

$$Q = AM\Pi = AM(\Pi - \Pi')\frac{\Pi}{\Pi - \Pi'} = AME\frac{\Pi}{\Pi - \Pi'}.$$

Pour que le rapport de la quantité de chaleur Q, qui est absorbée à la température T, à la force électromotrice E entre les températures T et T′ soit constant, il faudrait que le rapport $\frac{\Pi}{\Pi - \Pi'}$, ou simplement $\frac{\Pi}{\Pi'}$, fût indépendant de la nature des métaux en contact. Or, pour deux métaux donnés, la tension de contact est une fonction de la température; le rapport des tensions de contact Π et Π′ devrait donc être, pour toutes les combinaisons possibles de métaux, égal au rapport de deux mêmes fonctions des températures T et T′, et l'on aurait

$$\frac{\Pi}{\Pi'} = \frac{f(T)}{f(T')}.$$

Rien n'indique la nécessité d'une pareille relation et l'expérience prouve qu'elle est inexacte. En effet, pour certains couples métalliques, comme le couple Bismuth-Cuivre, par exemple, la force électromotrice est proportionnelle à la différence des températures, ce qui donne

$$\Pi - \Pi' = b(T - T'),$$

d'où l'on déduit, en désignant par Π_0 la tension de contact à la température de zéro,

$$\Pi = \Pi_0 + bT = b(a + T)$$
$$\Pi' = b(a + T').$$

Il en résulte

$$\frac{H}{H'} = \frac{a + T}{a + T'}.$$

Si cette relation était constante pour tous les contacts métalliques, on voit que la force électromotrice de deux métaux quelconques satisferait à la condition

$$\frac{H - H'}{H'} = \frac{T - T'}{a + T'}.$$

Par conséquent, la température T′ de l'une des soudures étant constante, la force électromotrice serait toujours proportionnelle à la différence des températures, ce qui n'a pas lieu. Cette condition n'est même pas suffisante, car il faudrait encore que le coefficient a fût constant, c'est-à-dire que la tension de contact à zéro, pour deux métaux quelconques, devrait être proportionnelle au coefficient de variation de la force électromotrice. Les effets Peltier ne peuvent donc être proportionnels aux forces électromotrices que dans des cas très-particuliers.

984. M. Le Roux [1] avait déjà étudié ce phénomène avec beaucoup de soin. Les deux branches A et B d'un couple étaient plongées dans deux calorimètres aussi identiques que possible et à la même température. On faisait traverser ce couple pendant 15 minutes par le courant de deux éléments de Bunsen à grande surface et on notait l'élévation de température correspondante de chacun des calorimètres.

On a obtenu ainsi avec un couple Bismuth-Cuivre :

DURÉE DU COURANT	ÉLÉVATION DE TEMPÉRATURE	
	SOUDURE A	SOUDURE B
Après une première période de 15 minutes . .	2°,07	3°,49
2e période de 15 minutes, le courant étant renversé.	3,61	1,65

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. X, p. 201.

Pour l'une des soudures A, l'élévation de température était la différence de deux termes, l'un a dû à la résistance de la partie métallique plongée dans le liquide, l'autre φ correspondant à l'effet Peltier; pour l'autre soudure, l'élévation de température provenait de la somme de deux effets analogues.

On déduit de la première expérience

$$a - \varphi = 2°,07,$$
$$b + \varphi = 3,49;$$

ce qui donne

$$b - a + 2\varphi = 1°,42.$$

La deuxième expérience donne de même

$$a - b + 2\varphi = 1°,98.$$

En ajoutant ces deux équations, on élimine l'influence de l'inégalité des deux soudures et l'on obtient

$$4\varphi = 3°,40 \quad \text{ou} \quad \varphi = 0°,85.$$

Comme les calorimètres n'étaient pas à la température ambiante, il fallait en outre étudier la loi du refroidissement et tenir compte de la chaleur perdue par rayonnement; il vient alors, toutes corrections faites,

$$\varphi = 0°,91.$$

De cette élévation de température on pouvait déduire la quantité de chaleur en connaissant la valeur en eau du calorimètre. Enfin, pour éliminer l'influence des variations d'intensité du courant dans la comparaison des expériences successives, on calculait chaque fois le nombre de calories qui eussent été dégagées pendant 15 minutes par un courant d'intensité constante, capable de réduire $1^{gr},314$ de cuivre en une minute. Ce sont ces quantités de chaleur Q que renferme la deuxième colonne du tableau; elles correspondent à une température moyenne de 25° pour le calorimètre. Les forces électromotrices renfermées dans la troisième colonne ont été déterminées directement, par une méthode d'opposition, sur les couples employés.

LE COURANT TRAVERSE LA SOUDURE EN ALLANT DU CUIVRE A L'UN DES MÉTAUX SUIVANTS	EFFET PELTIER Q	FORCE ÉLECTROMOTRICE ENTRE 0° ET 25° E	RAPPORT $-\frac{Q}{E}$
Antimoine de E. B. (1). . .	— 14,5	+ 60	0,242
Antimoine du commerce. .	— 5,4	+ 18	0,300
Fer.	— 2,8	+ 12,5	0,224
Cadmium.	— 0,51	+ 2,2	0,232
Zinc.	— 0,45	+ 0,7	0,614
Maillechort.	+ 2,75	— 11,7	0,235
Bismuth pur.	+ 21,3	— 81	0,263
Bismuth de E. B. (2). . .	+ 28,8	— 115	0,255

On voit par la dernière colonne que le rapport des quantités de chaleur aux forces électromotrices est loin d'être constant : le résultat relatif au zinc, par exemple, est plus que double de la moyenne. Les valeurs comparatives de ces rapports seraient d'ailleurs profondément modifiées si l'on changeait la température inférieure du couple, laquelle a été prise arbitrairement à zéro, puisque les forces électromotrices sont des fonctions différentes de la différence des températures.

985. M. Le Roux a cherché à vérifier que l'effet Peltier sur une soudure dépend de la température, en s'appuyant sur le raisonnement qui suit. Il résulte des expériences de M. Favre que, pendant la dissolution de $1^{gr},314$ de cuivre dans un couple de Daniell, il se dégage 977 calories ; cette quantité de chaleur est proportionnelle à la chute totale de potentiels, ou à la force électromotrice D. Si l'on désigne par M_1 l'intensité du courant qui produirait ce travail pendant l'unité de temps et par A l'équivalent calorifique du travail, on a

$$977 = AM_1D.$$

Pendant le même temps, il se dégagerait à la soudure de deux métaux, par exemple, pour le dernier cas du tableau, 28,8 calories. Appelant H_{25} la tension de contact de ces métaux à la tem-

(1) Cet alliage de M. Ed. Becquerel renferme un équivalent d'antimoine, un équivalent de cadmium et une quantité de bismuth égale au cinquième du poids total.

(2) Bismuth renfermant $\frac{1}{10}$ de son poids d'antimoine.

pérature de 25°, on aura

$$28,8 = AM_1H_{25}.$$

On en déduit

$$(1) \qquad H_{25} = D\,\frac{28,8}{977} = D.\ 0,0294.$$

D'autre part, les expériences de M. Ed. Becquerel donnent pour la force électromotrice de ce couple Bismuth-Cuivre, entre les températures de zéro et de 100°,

$$H_{100} - H_0 = D.\ 0,0062\ ;$$

comme cette force électromotrice est proportionnelle à la différence des températures, il en résulte

$$(2) \qquad H_{100} - H_{25} = \frac{75}{100}(H_{100} - H_0) = D.\ 0,0047.$$

On déduit enfin des équations (1) et (2)

$$\frac{H_{100}}{H_{25}} = \frac{341}{294} = \frac{7}{6} = 1 + \frac{1}{6}.$$

L'effet Peltier devrait donc augmenter de $\frac{1}{6}$ quand la température de la soudure passe de 25 à 100 degrés.

M. Le Roux a réalisé l'expérience avec des calorimètres à mercure portés à 100° : il a obtenu, pour un même courant,

$$\text{à } 25°, \quad 4z = 3,08\ ;$$
$$\text{à } 100°, \quad 4z = 3,98.$$

Le rapport de ces deux nombres est

$$\frac{3,98}{3,08} = \frac{40}{31} = 1 + \frac{9}{31} = 1 + \frac{1}{3.5}.$$

L'accroissement de chaleur dégagée est à peu près double de celui que donnerait le calcul. L'expérience n'est donc pas très-convainquante, mais l'effet observé est dans le sens prévu et l'on doit tenir compte des difficultés d'une telle expérience.

986. **Transport électrique de la chaleur.** — M. Thomson [1]

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LIV, p. 105.

a annoncé l'existence d'un phénomène thermique qui ne rentre pas dans les précédents et qu'il a désigné sous le nom de *transport électrique de la chaleur*.

Considérons un circuit formé de deux métaux dont les soudures P et P′ sont aux températures T et T′. Si l'on fait passer dans ce circuit un courant de même sens que celui que produirait l'échauffement de la soudure P, cette soudure absorbe de la chaleur et se refroidit. Comme, en général, le courant thermoélectrique augmente lorsque la différence des températures T — T′ va en croissant, il en résulte que le refroidissement de la soudure tend à diminuer le courant primitif. Mais, si cette température T est supérieure à celle qui produit la force électromotrice maximum, il faudra, pour que le courant primitif soit encore diminué, que la soudure P s'échauffe au lieu de se refroidir, et que l'effet Peltier soit renversé. Si la température T est justement celle du maximum, il n'y aura ni échauffement ni refroidissement, ce sera un *point neutre*.

Ce raisonnement de M. Thomson ne concorde pas avec la théorie du phénomène de Peltier. D'après ce que nous avons dit plus haut, le sens de l'effet Peltier dépend uniquement du signe de la différence des potentiels sur les métaux d'une même soudure et ce signe ne change pas à la température du maximum. Rien ne s'oppose même à ce que les températures des soudures soient telles, que les tensions aient le même signe sur toutes deux par rapport au sens dans lequel on parcourt le circuit et, par conséquent, qu'un courant d'origine étrangère produise un échauffement ou un refroidissement sur les deux soudures. Il y aurait lieu, en particulier, de vérifier directement le signe de l'effet Peltier sur une soudure dont la température serait supérieure à celle du maximum.

Quoi qu'il en soit, M. Thomson déduit de là que le passage d'un courant dans un fil dont la température n'est pas constante ne doit pas produire le même échauffement suivant que le courant va des parties froides aux parties chaudes, ou inversement. Considérons, par exemple, un fil homogène AB (fig. 285) dont les extrémités A et B sont maintenues à une température t, et dont la partie moyenne CD est à une température plus élevée T. Les excès de température aux différents points de cette barre

peuvent être représentés par une courbe AC'D'B, composée d'une partie rectiligne C'D' raccordée aux deux points A et B par des fragments de courbes AC' et D'B. Deux points M et N, également distants des extrémités, sont à des températures égales $t + MM'$ et $t + NN'$. Si l'on fait parcourir ce barreau par un courant dans un certain sens, AB, par exemple, les deux

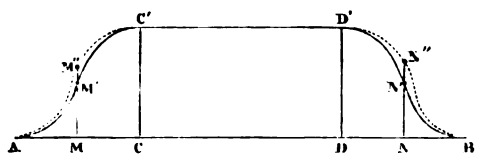


Fig. 285.

points M et N s'échaufferont, mais de quantités inégales M'M'' et N'N''; la courbe des températures sera représentée alors par la ligne pointillée. Cet échauffement sera dû à la résistance du barreau et à un transport particulier de la chaleur causé par le sens dans lequel varient les températures. En changeant le sens du courant, l'inégalité des échauffements se produira en sens contraire, et la différence des quantités de chaleur dégagées en un point correspondra au double de l'effet dû au transport électrique.

Après beaucoup de tâtonnements pour mettre ce phénomène en évidence, M. Thomson a fini par adopter la disposition suivante. Un paquet de fils de fer (fig. 286) est ficelé en un cer-

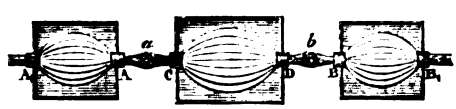


Fig. 286.

tain nombre de points A_1, A, C, D, B et B_1. Les portions extrêmes A_1A et BB_1 sont plongées dans un courant d'eau froide et la portion intermédiaire CD dans un bain à 100°. Entre les points A et C, D et B, le paquet est à peu près cylindrique et renferme deux thermomètres *a* et *b* disposés symétriquement. En faisant traverser ce paquet de fils par un courant énergique, il a observé

des températures différentes pour les deux thermomètres; les moyennes des expériences ont donné :

SENS DU COURANT	THERMOMÈTRES		DIFFÉRENCE
	a	*b*	*b* — *a*
De A en B	51°,54	53°,30	1°,76
De B en A	51°,32	53°,29	1°,97

Les thermomètres n'ont pas exactement la même température, quand le courant ne passe pas, à cause des défauts de symétrie de l'appareil, mais leur différence ne reste pas constante; l'excès $1,97 - 1,76 = 0°,21$ indique que le thermomètre *a* s'échauffe moins quand le courant va de B en A, et par conséquent qu'il y a un transport électrique de la chaleur en sens inverse du courant. L'excès ainsi obtenu étant le quadruple de l'effet du transport, ce dernier se trouve ainsi réduit à 0°,05.

Des expériences semblables, avec des fils de platine et de cuivre, ont montré que le platine se comporte comme le fer et que, pour le cuivre, le transport électrique de la chaleur a lieu dans le sens du courant. Toutefois, les nombres obtenus par M. Thomson ne sont pas assez concordants pour que l'on puisse même affirmer l'existence du phénomène.

987. M. Le Roux a employé pour étudier ce phénomène une sorte de méthode différentielle. Deux barres métalliques identiques AB, A'B', disposées parallèlement, plongent par leurs extrémités A et A' dans un bain à zéro; les extrémités B et B' réunies par un fil sont dans un autre bain à 100°. Une pile thermoélectrique, placée entre les deux barres, touche deux points symétriques M et M' et communique avec un galvanomètre. A l'aide d'un commutateur on peut faire passer alternativement en sens contraires, dans les deux barreaux, le courant d'une pile de Bunsen composée d'éléments à grande surface. Si la symétrie de l'appareil était complète, le galvanomètre ne devrait indiquer aucune déviation en l'absence d'un courant dans les barreaux, mais cette condition n'est pas nécessaire; la dif-

férence des déviations observées par l'inversion du courant donne le quadruple de l'effet dû au transport électrique.

M. Le Roux a cherché si cet effet est proportionnel à l'intensité du courant. Voici quelques expériences :

INTENSITÉ DU COURANT I	TRANSPORT ÉLECTRIQUE Th	RAPPORT $\frac{Th}{I}$
0,783	185	254
0,567	129	228
0,456	99	217
0,278	67	240

Les rapports de la troisième colonne sont sensiblement égaux, mais la variation d'intensité du courant n'a pas été assez grande ($\frac{1}{3}$) pour que l'on puisse considérer la loi comme suffisamment démontrée.

L'existence du phénomène étant établie, on peut désigner par un nom cette propriété particulière à chaque métal, et appeler rapport des *pouvoirs électro-thermiques* de deux métaux, le rapport des élévations de températures qu'ils éprouveront dans deux circonstances identiques, par suite du transport électrique de la chaleur. M. Le Roux a obtenu les résultats suivants pour un certain nombre de métaux. Le signe + indique que le transport électrique suit le courant, et le signe — que ce transport a lieu en sens contraire.

MÉTAUX	POUVOIRS ÉLECTROTHERMIQUES	MÉTAUX	POUVOIRS ÉLECTROTHERMIQUES
Bismuth de E. B.	+ 75	Plomb	0
Antimoine	+ 64	Étain	— 0,1
Cadmium	+ 31	Aluminium	— 0,1
Zinc	+ 11	Platine	— 18
Bronze d'aluminium	+ 6	Antimoine de E. B.	— 24
Argent	+ 6	Maillechort	— 25
Cuivre	+ 2	Fer	— 31
Laiton	+ 0,3	Bismuth pur	— 31

Il n'y a d'ailleurs aucune relation entre les pouvoirs électrothermiques et les forces électromotrices des couples que l'on peut former avec les différents métaux.

Ce phénomène curieux du transport électrique de la chaleur ne paraît pas facile à interpréter. On ne peut guère admettre que la résistance électrique d'un conducteur métallique, dont les différents points ne sont pas à la même température, dépende du sens dans lequel il est traversé par un courant; on doit plutôt en conclure que ces différences de température produisent des différences de potentiel, analogues à celles qui existent au contact de deux métaux. Les absorptions ou dégagements de chaleur correspondants seraient alors comparables au phénomène de Peltier, et proportionnels à l'intensité du courant. Cette manière de voir suffirait pour expliquer les phénomènes. Elle ne serait pas en contradiction avec les expériences par lesquelles on démontre que l'échauffement d'un barreau homogène ne donne aucun courant, parce que, dans ce dernier cas, il existe de part et d'autre du point chauffé des changements de température en sens opposés, qui produiraient des différences de potentiel égales et de signes contraires.

PYROÉLECTRICITÉ.

988. **Découverte des propriétés de la tourmaline.** — Vers la fin du dix-septième siècle, les Hollandais rapportèrent des Indes orientales, et surtout de l'île de Ceylan, une pierre curieuse que les gens du pays désignaient sous le nom de *tournamal*, qui signifie tire-cendres, à cause de la propriété qu'elle possède d'attirer les cendres quand on la jette dans le feu.

Cette pierre, qu'on a depuis appelée tourmaline et qui semble être le lyncurium des anciens (1), est devenue rapidement célèbre; elle a donné lieu à un grand nombre d'observations, pour la plupart discordantes, et l'on fut assez longtemps avant d'être fixé sur ses véritables propriétés. Lemery en donna la première description (2); il reconnut que la tourmaline, après avoir été chauf-

(1) Watson, *Phil. trans. abridged*, vol. XI, p. 419 (1750).
(2) *Histoire de l'Académie des sciences* (1717), p. 7.

fée, attire et repousse ensuite de petits corps légers, tels que les cendres, la limaille de fer, des morceaux de papier, etc.

Œpinus, en 1756, reconnut le premier que les propriétés de la tourmaline sont dues à un développement d'électricité, que les deux extrémités d'un cristal chauffé sont toujours électrisées en sens contraires, l'une positivement et l'autre négativement, que ces propriétés se montrent dans tous les échantillons, quelle que soit leur forme, et qu'on peut les manifester à un très-haut degré en plongeant la tourmaline dans l'eau bouillante, puis la laissant refroidir après l'avoir essuyée; il a pu même tirer d'une tourmaline une petite étincelle visible dans l'obscurité. Une tourmaline présente donc deux *pôles électriques* comparables aux pôles d'un aimant.

Peu de temps après (1), Canton fit cette observation importante que la polarité de la tourmaline n'est pas due à la température même, mais à ses variations. Quand on échauffe une tourmaline, les deux extrémités deviennent, l'une A positive, l'autre B négative. Si alors on ramène les extrémités à l'état neutre en les touchant avec des corps conducteurs et qu'on laisse refroidir le cristal, l'extrémité A devient au contraire négative, et l'autre B positive. Il y a donc inversion des signes électriques, en même temps que changement de signe des variations de température, et toute production d'électricité disparaît quand la température est constante. Canton a reconnu aussi que les extrémités d'une tourmaline deviennent lumineuses, quand on chauffe ou qu'on refroidit le cristal, de sorte que l'on peut reconnaître les signes des pôles par la différence des deux lueurs.

Enfin, il résulte encore d'une expérience de Bergmann que les quantités d'électricité accumulées aux deux pôles d'une tourmaline, pendant une variation de température déterminée, sont égales et de signes contraires. En plongeant une tourmaline dans un vase métallique qui contenait de l'eau chaude et communiquait avec une paire de pendules, Bergmann n'aperçut aucune divergence des pendules, d'où il résulte que la somme algébrique des électricités était toujours nulle.

989. Comme la tourmaline est un corps mauvais conducteur

(1) *Phil. trans.*, vol. LI, p. 403, (1759.)

de l'électricité, on peut aussi l'électriser par frottement; si l'on combine cette propriété nouvelle avec la précédente, et surtout si les deux pôles du cristal éprouvent des changements de température différents, il peut en résulter des effets extrêmement complexes qui ont rendu très-difficile l'étude de ce phénomène.

Ainsi, pendant qu'un cristal se refroidit, on peut électriser par frottement le pôle qui doit devenir négatif. Cette extrémité donne alors des signes d'électricité positive, de sorte que la tourmaline semble électrisée d'une seule manière dans toute son étendue. D'autre part, quand une baguette de tourmaline se refroidit uniformément, l'une des extrémités A étant positive et l'autre B négative, il y a nécessairement vers le milieu un point neutre. Si, en même temps qu'on laisse refroidir l'extrémité A, on échauffe l'autre extrémité, on voit que les deux pôles extrêmes seront positifs; mais alors la région moyenne du cristal est négative, et elle possède une quantité d'électricité égale à la somme de celles qui existent aux extrémités. Dans ce cas, le cristal entier se comporte comme s'il était formé de deux cristaux différents, ajoutés bout à bout par leurs pôles de mêmes signes, et il existe deux points neutres. On peut aussi faire en sorte que l'un des points neutres soit à une extrémité, ce qui donne lieu à un grand nombre de combinaisons, sur lesquelles il est inutile d'insister.

990. Toutes ces particularités présentent la plus grande analogie avec les pôles des aimants ordinaires et la distribution du magnétisme dans les barreaux aimantés à points conséquents. Canton a retrouvé aussi le phénomène corrélatif de la rupture des aimants. En brisant une tourmaline qui se refroidit et qui possède deux pôles électriques seulement, il a constaté que les morceaux présentent chacun deux pôles, et que les extrémités nouvelles correspondant à la rupture sont de signes contraires.

Brewster (1) a montré qu'il en est ainsi pour les plus petits fragments. Quand on jette sur une lame de verre la poussière obtenue en broyant une tourmaline dans un mortier d'acier, on reconnaît qu'elle n'y adhère pas, si la lame est à la température ordinaire; mais, aussitôt qu'on chauffe la lame, l'adhérence

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXVIII, p. 161.

devient manifeste, et si l'on agite la poudre, elle a une tendance évidente à se réunir en pelotons qui rappellent l'expérience du spectre magnétique.

991. M. Becquerel (1) a employé une méthode ingénieuse pour évaluer les quantités d'électricité développées pendant l'échauffement ou le refroidissement. La tourmaline est placée dans une chape en papier suspendue par un fil de cocon dans l'intérieur d'un vase en verre. Dans ce vase et à peu de distance des extrémités du cristal sont deux tiges qui communiquent avec les pôles d'une pile sèche. Aussitôt que la tourmaline est devenue électrique, elle se place dans la ligne des tiges et, si on la dérange de cette position, elle y revient par une suite d'oscillations dont la vitesse peut servir à déterminer la quantité d'électricité qui existe aux extrémités. Toutefois, à cause des propriétés isolantes de la tourmaline, les charges électriques se conservent longtemps, de sorte que la durée des oscillations qui s'effectuent pendant un changement de température déterminé dépend, non pas seulement de cette variation de température, mais de la quantité d'électricité accumulée déjà depuis le début de l'opération. La charge réelle est alors, sauf la déperdition, l'intégrale de toutes celles qui se sont développées, par suite des changements de température successifs.

992. Cette propriété constatée d'abord dans la tourmaline, puis étendue à un grand nombre d'autres cristaux naturels ou artificiels, a reçu le nom de *pyro-électricité* pour la distinguer de la *thermo-électricité*, réservée à l'ensemble des phénomènes produits par la chaleur dans les métaux et les corps conducteurs. Pour rendre la description des expériences plus rapide, nous appellerons, avec MM. Riess et Rose (2), *pôle analogue* d'un cristal celui qui devient positif quand la température s'élève, et négatif quand elle s'abaisse, de sorte que le signe d'électricité est toujours le même que celui de la variation de température, et *pôle antilogue* l'extrémité dont le signe électrique est contraire à celui de la variation de température.

995. **Expériences de M. Gaugain.** — Les propriétés électriques de la tourmaline ont été nettement établies par M. Gau-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXXVI, p. 7.
(2) *Archives de l'électricité*, t. III, p. 585.

gain (1) à l'aide d'expériences très-ingénieuses. On peut résumer ce travail en disant qu'une tourmaline, qui s'échauffe ou se refroidit, doit être considérée comme une pile électrique, dont la force électromotrice est considérable, mais dont la résistance intérieure est aussi très-grande. Si donc on réunit par un fil extérieur, de résistance λ', les deux pôles d'une tourmaline dont la résistance intérieure est λ et la force électromotrice E, l'intensité du courant aura pour expression

$$M = \frac{E}{\lambda + \lambda'} = \frac{E}{\lambda\left(1 + \frac{\lambda'}{\lambda}\right)}.$$

Si la communication extérieure des deux pôles est métallique, le rapport des résistances $\frac{\lambda'}{\lambda}$ est toujours négligeable, de sorte que l'intensité du courant ne dépend que de la force électromotrice et de la résistance du cristal. Cet énoncé permettra de comprendre rapidement la suite des expériences.

M. Gaugain a constaté d'abord quelques faits généraux qu'il est utile de signaler. La tourmaline conduit très-mal l'électricité à la température ordinaire : si l'on met un électroscope à feuilles d'or en communication avec le sol par l'intermédiaire d'un cristal de tourmaline, cette communication n'empêchera pas en général l'électroscope de recevoir et de conserver les charges qu'on pourra lui transmettre; mais si, après avoir constaté ainsi que l'échantillon sur lequel on opère est dépourvu de conductibilité, on le porte à une température assez élevée pour que les effets électriques disparaissent, on constate qu'il est alors devenu conducteur et peut décharger instantanément un électroscope. Cette observation explique tout naturellement la disparition des signes électriques aux températures élevées, quelles que soient alors les variations de température.

En outre, la tourmaline est hygrométrique, comme le verre, et il résulte de cette propriété que, dans certaines circonstances, la conductibilité du cristal peut paraître assez forte, même à la température ordinaire. Nous avons déjà signalé (34) la conduc-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LVII. p. 5.

tibilité qu'acquiert une tourmaline en se refroidissant dans l'air, après avoir été chauffée à 500°, et la disparition de cette conductibilité par un lavage à l'eau. On peut admettre que la tourmaline s'altère à une température élevée, et que la surface se recouvre d'une nouvelle substance éminemment hygrométrique; mais cette explication, toute vraisemblable qu'elle paraît, ne doit être considérée que comme une hypothèse, parce qu'il n'a pas été possible de constater que le lavage, qui modifie d'une manière si notable l'action hygrométrique de la tourmaline, lui enlève réellement quelque chose.

Il se présente aussi plusieurs autres anomalies. Ainsi toutes les variétés de tourmalines ne sont pas également électriques : les tourmalines du Brésil, vertes ou bleues, sont celles qui fournissent, toutes choses égales d'ailleurs, le plus d'électricité et, dans les échantillons de même teinte, ce sont, en général, les plus claires qui donnent les effets les plus marqués.

M. Becquerel avait exprimé l'opinion que la tourmaline ne laisse point échapper d'électricité, ni n'en prend aux corps voisins, parce qu'il n'a pu parvenir à charger un condensateur de Volta au moyen d'une tourmaline dont il élevait la température. Cet insuccès tient à ce que M. Becquerel laissait la tourmaline isolée; l'expérience réussit très-facilement, au contraire, si l'on met les deux pôles du cristal en communication respective avec les deux plateaux, conséquence naturelle de l'existence d'une force électromotrice entre les deux pôles.

994. Pour recueillir l'électricité d'une tourmaline, il ne faut pas se contenter d'un simple contact; on enroule un fil de métal en hélice autour des points que l'on veut observer, des extrémités par exemple. On peut ainsi montrer la distribution des potentiels aux différents points d'un cristal. Pour cela, on met des anneaux de fil métallique aux extrémités A et B d'une baguette de tourmaline, un troisième anneau au milieu C, et l'on met ce dernier en communication avec un électroscope. Quand, le cristal se refroidissant, les extrémités A et B sont maintenues isolées, l'électroscope reste à l'état neutre : le potentiel du milieu de la baguette est donc nul. Si l'on met l'une des extrémités A en communication avec le sol, l'électroscope se charge, par exemple, d'électricité positive. L'extrémité A est alors au po-

tentiel zéro, et le milieu C à un potentiel égal à la moitié de la différence qui existe entre les deux pôles. En mettant l'extrémité B en communication avec le sol et isolant la première, l'électroscope se charge cette fois d'une quantité égale d'électricité négative; le point C est alors à un potentiel égal au précédent et de signe contraire.

M. Gaugain mesurait l'électricité fournie par la tourmaline dans un circuit fermé au moyen d'un électroscope à décharges; il avait précisément imaginé cet appareil à propos de ses recherches sur la pyroélectricité. L'un des pôles d'une tourmaline, qui se refroidit ou s'échauffe, communiquant avec le sol, l'autre pôle est relié par un fil conducteur avec un électroscope à décharges. La quantité d'électricité qui s'écoule est proportionnelle au nombre total des décharges, et l'intensité du courant est proportionnelle au nombre de celles qui se produisent pendant l'unité de temps.

995. Si l'on forme une pile de n tourmalines identiques réunies en quantité, l'intensité du courant sera donnée par la formule

$$M = \frac{E}{\frac{\lambda}{n} + \lambda'},$$

ou, sans erreur sensible,

$$M = \frac{E}{\frac{\lambda}{n}} = n\frac{E}{\lambda};$$

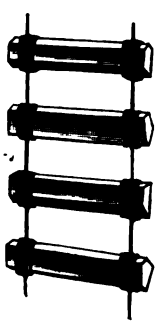


Fig. 287.

l'intensité du courant sera donc n fois plus grande que si le circuit ne renfermait qu'une seule tourmaline. L'identité des tourmalines n'est pas facile à réaliser, mais il résulte des mêmes formules que, si plusieurs couples différents sont réunis en quantité dans un circuit qui est fermé par un fil de résistance négligeable, l'intensité du courant est égale à la somme des intensités de tous les couples séparément.

Avec 32 tourmalines différentes, M. Gaugain a formé 8 groupes de 4 tourmalines (fig. 287) réunies à l'aide de fils de métal par leurs pôles de mêmes noms. Un ou plusieurs de ces groupes

étaient placés dans une étuve à air que l'on pouvait démonter rapidement. Les communications étant établies pour l'expérience, on chauffait l'étuve à 150° avec une lampe à alcool, puis on enlevait la lampe, on démontait l'étuve et l'on comptait le nombre total des décharges de l'électroscope, jusqu'à ce que les tourmalines fussent revenues à la température ambiante. En désignant par les numéros 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 les différents groupes de tourmalines, on a obtenu les résultats suivants :

GROUPES ASSOCIÉS EN QUANTITÉ	NOMBRE DE DÉCHARGES DE L'ÉLECTROSCOPE
1,4	18,9
1,4,5,6,7,8	57,6
7,8	25,7
1,4,5,6,7,8	58,7
5,6	17,4
1,4,5,6,7,8	60,6
1,4	18,6

On voit d'abord que les trois expériences faites avec les six groupes réunis ont donné des nombres très-voisins 57,6 — 58,7 — 60,6; il en est de même pour les groupes 1 et 4. Le résultat relatif à la pile de six groupes peut être calculé en ajoutant les nombres observés pour les différents groupes considérés deux à deux; on trouve ainsi $18,7 + 17,4 + 25,7 = 61,8$, valeur qui diffère à peine de celles qui ont été obtenues directement. Enfin, en prenant la moyenne 59 pour la pile totale et retranchant de là le nombre 18,7 relatif à la pile (1, 4), on trouve 40,3 pour la pile (5, 6, 7, 8), au lieu de 43,1 que donnerait la somme des nombres obtenus pour les piles (5, 6) et (7, 8).

996. Pour une pile de n tourmalines identiques réunies en tension, l'intensité du courant serait

$$M = \frac{nE}{n\lambda + \lambda'} = \frac{E}{\lambda + \frac{\lambda'}{n}},$$

ou sensiblement

$$M = \frac{E}{\lambda},$$

c'est-à-dire la même qu'avec une seule tourmaline. L'expérience a été faite avec deux fragments A et B d'une même tourmaline brisée; on a ainsi obtenu

Avec les deux fragments A + B. . . .	47,5	décharges.
Avec le premier fragment A.	45,6	»
Même expérience.	45,8	»
Avec les deux fragments A + B. . . .	46,9	»

La moyenne des nombres extrêmes est 47,2; celle des deux autres est 45,7; la différence est insignifiante.

997. Les deux tourmalines A et B ajoutées bout à bout peuvent être considérées comme n'en formant qu'une seule; il en résulte que la force électromotrice d'une tourmaline est, de même que dans une pile de couples de Volta, proportionnelle à la longueur. Comme la résistance est en raison inverse de la section, les intensités des courants fournis par des tourmalines différentes doivent être proportionnelles aux sections; c'est ce que montrent les expériences suivantes faites avec trois prismes de longueurs inégales et de sections différentes.

CRISTAL EMPLOYÉ	SECTION s	NOMBRE DES DÉCHARGES n	$\frac{n}{s}$
1er prisme. . .	259 m.m.c.	70,7	3,65
2e prisme. . . .	135	59,3	3,43
3e prisme. . . .	37	10,4	3,60

Les sections ont varié dans le rapport de 7 à 1, et la proportionnalité n'est pas douteuse. Il est donc bien démontré qu'une tourmaline qui se refroidit entre deux températures déterminées se comporte exactement comme une pile de Volta, et qu'il s'établit entre les deux extrémités une différence de potentiel proportionnelle à la longueur de cristal.

998. Les décharges de l'électroscope sont d'autant plus fréquentes que le refroidissement est plus rapide; elles se succèdent moins vite, par exemple, pour les grosses tourmalines que pour les petites, et les dernières décharges sont beaucoup plus espa-

cées que les premières. Mais, comme la durée de la décharge totale n'intervient pas dans tous les résultats qui précèdent, on en conclut que la quantité d'électricité qui s'écoule pendant le refroidissement d'une tourmaline, entre deux températures déterminées T_1 et T_2, est indépendante du temps et, par suite, que l'intensité du courant est proportionnelle à la vitesse de refroidissement. La quantité d'électricité dM, qui s'écoule entre deux températures $T + dT$ et T, est une fonction de la température T et de la différence dT, indépendante du temps dt pendant lequel l'opération a lieu ; on peut donc écrire

$$dM = f(T)dT$$

ou bien

$$\frac{dM}{dt} = f(T)\frac{dT}{dt} = \varphi'(T)\frac{dT}{dt},$$

d'où l'on déduit, pour les limites T_1 et T_2,

$$M = \varphi(T_1) - \varphi(T_2).$$

M. Gaugain n'a pas cherché comment varie le rapport de la vitesse de refroidissement $\frac{dT}{dt}$ à la vitesse d'écoulement $\frac{dM}{dt}$, ou à l'intensité, c'est-à-dire quelle est la nature de la fonction $\varphi(T)$, mais il a vérifié par des expériences directes que la durée du refroidissement n'influe en rien sur le nombre total des décharges. Cette expérience n'est pas facile à réaliser. On active le refroidissement en projetant avec un soufflet un courant d'air sur les tourmalines, mais cette opération a deux effets de sens contraires. Un refroidissement plus rapide diminue les fuites d'électricité dues à la déperdition par les surfaces, ce qui tend à augmenter le nombre des décharges; mais, d'autre part, l'air froid qui afflue enlève de l'électricité aux conducteurs et produit un effet opposé. On peut même, en faisant varier la distance des feuilles d'or de l'électroscope à la boule de décharge, faire dominer l'une ou l'autre de ces deux causes. Avec 15 tourmalines réunies en quantité, M. Gaugain a obtenu, comme moyenne de trois expériences successives pour chacun des cas :

DISTANCE MAXIMUM DES FEUILLES D'OR AVANT LE CONTACT AVEC LA BOULE	NOMBRE DE DÉCHARGES	
	REFROIDISSEMENT LENT	REFROIDISSEMENT RAPIDE
40mm	17	19,7
20mm	122	112

On doit en conclure que les deux décharges seraient rigoureusement égales, s'il était possible d'éliminer absolument les déperditions par la surface.

999. Il reste enfin à comparer les effets produits par l'échauffement et le refroidissement. On avait trouvé généralement que l'échauffement des tourmalines donnait moins d'électricité, mais les différences tiennent à des causes d'erreurs particulières aux expériences. Les tourmalines sont en général un peu humides, et par conséquent un peu conductrices : il en résulte une perte d'électricité pendant la période d'échauffement, mais en même temps les tourmalines se dessèchent, deviennent plus isolantes et fournissent une quantité d'électricité plus grande en se refroidissant. Il faut éviter, en outre, de chauffer les tourmalines par un courant d'air ou par les gaz chauds qui viennent des produits de la combustion, parce que ces courants gazeux causent une perte notable d'électricité.

M. Gaugain employait, pour cela, une étuve mobile formée par une boîte rectangulaire en plaques de métal, ouverte à ses deux extrémités, et dans laquelle la pile de tourmalines était portée par une planchette. On faisait glisser l'étuve comme un manchon autour des tourmalines pour produire l'échauffement, et on l'écartait pour les laisser refroidir. Les deux effets pouvaient ainsi être alternés, l'échauffement et le refroidissement durant le même temps, 4 minutes par exemple ; on arrivait bientôt, même avec des durées différentes pour les deux phénomènes, à un équilibre périodique, dans lequel les variations de température étaient égales et de sens contraires. Il faut remarquer en outre que, pendant l'échauffement, l'écoulement de l'électricité était un peu modifié par le voisinage des parois de la

cage qui jouaient le rôle de condenseur; on évitait cette cause d'erreur en ayant soin que, pendant le refroidissement, une plaque de métal, dite de compensation, vînt se placer au-dessous de la pile pour produire la même influence que la cage.

En opérant ainsi et attendant que le régime périodique fût parfaitement établi, M. Gaugain a obtenu comme moyenne des 5 derniers refroidissements 24,2 décharges, et pour les 5 derniers réchauffements 24,1 décharges, nombres absolument identiques. Il en résulte que la quantité d'électricité produite par une tourmaline entre deux températures déterminées est indépendante du temps pendant lequel s'effectue et du sens dans lequel a lieu le changement de température.

1000. La conclusion générale de ce mémoire est donc, comme

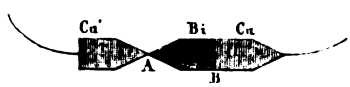


Fig. 288.

nous l'avons dit au début, qu'une tourmaline est exactement comparable à une pile de couples de Volta, infiniment minces et de résistances considérables. M. Gaugain compare la tourmaline à une pile thermoélectrique de grande résistance, dont le refroidissement serait inégal dans les différents points, et il a construit un couple qui produit les mêmes effets. Un cône de bismuth *Bi* (fig. 288) est soudé, par sa pointe et par sa base, à la pointe et à la base de deux cônes de cuivre tout semblables *Cu'* et *Cu*, lesquels sont réunis par le fil d'un galvanomètre. Quand on soumet ce couple à l'action d'une source de chaleur, la soudure A des deux pointes s'échauffe plus rapidement que la soudure B des deux bases, et il se produit un courant dans un certain sens; le courant est de sens contraire quand on laisse refroidir le couple, parce que la température de la soudure A diminue plus rapidement que celle de la soudure B; enfin, lorsque le couple est maintenu à température constante, il ne se manifeste aucun courant.

1001. **Caractères des cristaux pyroélectriques.** — Les phénomènes pyroélectriques ne sont pas particuliers à la tourmaline; on les a observés aussi sur un grand nombre de cristaux, mais à un degré moins élevé. Canton avait déjà reconnu les mêmes

propriétés dans la topaze et l'émeraude du Brésil ; Brard dans l'axinite ; Haüy dans la boracite, le mésotype, l'oxyde de zinc, la prehnite, le sphène ; Brewster dans beaucoup d'autres minéraux naturels, tels que le spath calcaire, le béryl, le spath fluor, le quartz, etc., et dans plusieurs cristaux artificiels. Parmi ces derniers se distinguent surtout le tartrate de potasse et de soude et l'acide tartrique.

L'étude détaillée de toutes ces substances, au point de vue des phénomènes électriques, n'offrirait pas grand intérêt s'il n'existait entre la polarité électrique et la forme des cristaux une relation remarquable. Haüy a remarqué le premier (1) que les substances minérales cristallisées qui possèdent les propriétés pyroélectriques, telles que la tourmaline et la boracite, dérogent à la loi de symétrie, c'est-à-dire que les parties opposées correspondantes ne sont pas semblables par le nombre, la disposition et la figure de leurs faces. Cette observation a été ensuite confirmée et généralisée, en particulier par les nombreuses observations de MM. Riess et Rose. La dissymétrie dont il est ici question n'est pas seulement une hémiédrie non superposable ou *plagièdre*, comme celle qui joue un rôle si important dans les propriétés rotatoires, d'après M. Pasteur, c'est l'hémiédrie à faces inclinées ou *tétraédrique*. Il paraît y avoir une relation constante entre ce genre particulier d'hémiédrie et la pyroélectricité.

Le plus souvent, les cristaux pyroélectriques n'ont que deux pôles, comme la tourmaline ; ce sont d'abord tous ceux qui appartiennent aux systèmes cristallins à un axe : le prisme droit à base carrée et le rhomboèdre. Ces cristaux ont alors un *axe électrique* défini par la droite qui joint les deux pôles, et qui coïncide avec l'axe de cristallisation. Mais il arrive quelquefois que le cristal présente plus de deux pôles, ce qui donne lieu à plusieurs axes électriques, que l'on obtient en joignant les pôles deux à deux, un pôle analogue avec un pôle antilogue. Sous ce point de vue, on connaît jusqu'à présent quatre dispositions.

1002. 1° *Cristaux à un axe électrique.* — Le type de cette première classe de cristaux est la *tourmaline*, dont la forme cristalline appartient au système rhomboédrique. Les cristaux

(1) *Traité de minéralogie*, t. III, p. 54. — *Annales de Chimie*, 1re série, t. IX, p. 59.

naturels se présentent presque toujours en baguettes prismatiques triangulaires, dont les arêtes sont modifiées plus ou moins profondément par d'autres troncatures, en particulier par six pans qui constituent un prisme hexagonal ; mais les extrémités du prisme sont le plus souvent brisées, de sorte qu'on ne distingue ni les faces du rhomboèdre primitif, ni les facettes de modification. Quand on trouve un cristal complet dont les deux bouts sont terminés par des facettes naturelles, on remarque qu'ils sont très-inégalement chargés de troncatures. L'hémiédrie se manifeste, tantôt par une seule face perpendiculaire à l'axe, tantôt par des facettes obliques appartenant à des rhomboèdres différents. Dans la figure 289, qui représente une forme assez fréquente, l'extrémité supérieure porte les trois faces P du rhomboèdre primitif appuyées sur trois faces latérales

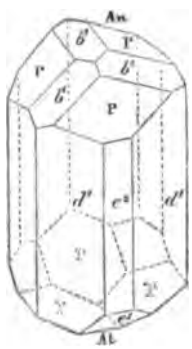


Fig. 289.

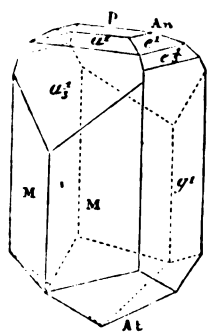


Fig. 290.

du prisme triangulaire e^2 : cette extrémité forme le pôle analogue, l'autre est le pôle antilogue. Les éléments hémiédriques sont ici les facettes b^1 et e^1 de deux rhomboèdres distincts.

Le *silicate de zinc* appartient au prisme droit à base rhombe, mais la dissymétrie ne se manifeste que par rapport à l'un des axes de cristallisation et il n'existe aussi qu'un axe électrique, parallèle à l'axe d'hémiédrie. Dans la figure 290 cet axe est vertical, et l'on voit que les extrémités sont très-différentes : le pôle analogue est terminé par une base plane P et le pôle antilogue par le sommet d'un octaèdre.

Des modifications de même ordre se manifestent dans la forme cristalline des minéraux suivants, qui jouissent des mêmes

propriétés que la tourmaline : scolézite, titanite, spath pesant, quartz, etc.; et, parmi les cristaux artificiels, la struvite, les acides tartriques, les tartrates, etc.

2° *Cristaux à deux axes électriques opposés.* — La *prehnite* cristallise aussi dans le système du prisme droit à base rhombe; les cristaux se rencontrent souvent sous la forme de tablettes losanges dont les deux plus grands angles sont de 100° et dont les autres, de 80°, sont habituellement tronqués par des facettes latérales. Un pareil cristal possède trois pôles électriques, l'un analogue placé au centre du losange, et les deux autres antilogues aux extrémités de la plus courte diagonale. Le pôle analogue unique possède une quantité d'électricité égale à la somme de celles qui se manifestent aux deux autres; on peut comparer le phénomène à l'ensemble de deux aimants ajoutés bout à bout par leurs pôles de même nom, et considérer la prehnite comme possédant deux axes électriques opposés.

La topaze est dans le même cas.

3° *Cristaux à deux axes électriques parallèles.* — L'*axinite* (silicate de chaux et de magnésie) cristallise dans le système du prisme doublement oblique. Un pareil cristal n'a pas de plan de symétrie : les différents éléments du cristal, angles et faces, sont seulement symétriques deux à deux par rapport au centre; l'hémiédrie ne peut donc se manifester que par l'existence d'une seule troncature. Les cristaux d'axinite ont généralement la forme indiquée par la figure 291; on y voit sur les angles quatre troncatures dont deux *e* sont des triangles et deux autres *i* des quadrilatères. Les troncatures triangulaires sont des pôles antilogues et les facettes quadrangulaires des pôles analogues. Si l'on joint ces pôles deux à deux, on aura donc deux axes électriques parallèles et de sens contraires, symétriques par rapport au centre du cristal.

4° *Cristaux à quatre axes électriques.* — Les cristaux de *boracite* (borate de magnésie) appartiennent au système cubique et présentent en général de nombreuses modifications. La forme le plus fréquente est un cube (fig. 292) portant sur ses arêtes les troncatures du dodécaèdre rhomboïdal. En même temps les huit angles sont modifiés, mais de manières différentes : sur quatre d'entre eux on voit des facettes hexagonales brillantes a^1, qui cor-

respondent à un premier tétraèdre régulier ; les quatre autres angles portent de petites facettes triangulaires α^1, d'une apparence mate, qui correspondent à un second tétraèdre. Les faces brillantes a^1 du premier tétraèdre sont des pôles antilogues et les facettes triangulaires α^1 du second des pôles analogues. Si l'on joint ces pôles deux à deux par des diagonales, on obtient quatre axes électriques qui se coupent au centre du cube.

La rhodizite donne aussi quatre axes électriques.

1003. **Courants pyroélectriques.** — Il doit se produire des

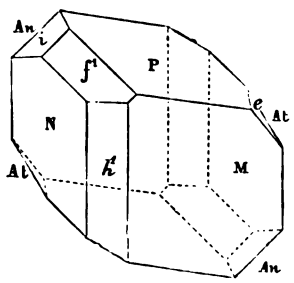


Fig. 291.

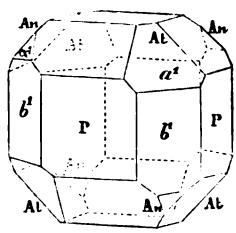


Fig. 292.

courants électriques ordinaires quand on réunit par un fil conducteur les deux pôles d'un cristal pyroélectrique; comme la résistance du cristal est en général considérable, l'intensité est très-faible, mais on peut augmenter beaucoup la longueur du fil interpolaire, ce qui permet d'employer des galvanomètres très-résistants. Avec un galvanomètre à 24 mille tours, destiné aux expériences de physiologie, M. Du Bois-Reymond a obtenu un courant sensible en plaçant une plaque de tourmaline chaude entre deux lames de platine.

Ce mode d'observation permet de reconnaître l'existence des propriétés pyroélectriques dans certains cristaux qui n'en manifestent pas aux appareils habituels d'électricité statique, surtout pour le cas où les cristaux sont bons conducteurs. M. Friedel (1) a constaté ainsi, en opérant sur des plaques à faces parallèles taillées dans des cristaux suivant différentes directions, que la panabase (cuivre gris) est pyroélectrique et que les axes d'électricité sont parallèles aux diagonales du cube, comme dans la bo-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XVII, p. 79.

racite. La chalcopyrite a manifesté aussi les mêmes propriétés d'une manière non douteuse, mais la difficulté de trouver des cristaux non maclés n'a pas permis de déterminer la direction des axes électriques.

1004. **Thermoélectricité des cristaux.** — M. Marbach, cherchant une relation entre l'hémiédrie et les propriétés physiques, a trouvé qu'en effet les cristaux de pyrite de fer se partagent en deux classes jouissant de propriétés thermoélectriques très-différentes (1). Le cristal soumis à l'épreuve était soutenu par un corps isolant et placé entre deux fils de métal qui communiquaient avec un galvanomètre. L'un de ces fils était d'abord chauffé avec une lampe à alcool, puis pressé contre le cristal. Dans ces conditions, il se produit un courant thermoélectrique, puisque les deux contacts du métal avec la masse cristalline sont à des températures différentes; mais, avec certains échantillons, le courant marche du métal au cristal à travers le contact chaud, tandis que l'autre sorte de cristaux donne un courant dans un sens opposé. Le cobalt gris (arsénio-sulfure de cobalt) donne des résultats analogues. La différence des propriétés se manifeste avec presque tous les métaux, car la pyrite et le cobalt gris, suivant l'échantillon sur lequel on opère, sont plus négatifs que le bismuth ou plus positifs que l'antimoine : les deux classes d'une même espèce cristalline se placent ainsi aux deux extrémités de l'échelle des métaux.

1005. M. Friedel a confirmé ces résultats, en particulier pour le sulfure de fer, et constaté quelques autres circonstances intéressantes. Les faces du cube qui constitue la forme primitive de ce cristal sont tantôt couvertes de stries, tantôt parfaitement lisses, et ces deux états se trouvent souvent sur une même face naturelle. Si l'on touche par deux fils de platine, l'un chaud et l'autre froid, deux régions voisines dont l'une est lisse et l'autre striée, on obtient en général des courants de sens contraires.

M. Friedel a cherché aussi s'il existe dans la pyrite des phénomènes pyroélectriques analogues à ceux que présente la tourmaline. Quand on place dans un étuve un petit cristal entre deux fils de platine, on obtient généralement un courant sensible

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XLV, p. 707.

pendant que la température s'élève ou s'abaisse, et ce courant change de sens avec la variation de température, mais il est dû le plus souvent à la forme même du cristal qui donne lieu à des variations inégales de la température aux deux points de contact, comme dans l'expérience de M. Gaugain avec le double cône de bismuth et de cuivre (1000). Si l'on évite cette cause d'erreur en se servant d'une plaque à faces parallèles et plaçant successivement le cristal dans deux positions symétriques par rapport à l'étuve, pour éliminer l'inégalité d'échauffement, on obtient un courant dans un sens pendant que le cristal s'échauffe et en sens contraire pendant le refroidissement, ce qui paraît présenter les caractères de la pyroélectricité.

Toutefois l'expérience n'est pas concluante, car on ne réussit à découvrir aucune régularité dans la disposition des axes électriques. D'autre part, la pyrite est très-souvent maclée et les phénomènes peuvent s'expliquer par la coexistence des deux variétés sur un même cristal. On obtient, en effet, des résultats tout à fait analogues en plaçant dans une étuve à température variable une double lame de bismuth et d'antimoine serrée entre deux fils de platine. Le premier effet de la variation de température est de produire un courant dont le sens est déterminé par les contacts du platine avec les deux métaux; mais, bientôt après, l'échauffement ou le refroidissement se communiquent, au contact du bismuth, avec l'antimoine, lequel donne un courant de sens contraire plus énergique. On ne peut donc pas affirmer l'existence, dans les cristaux de pyrite, d'une pyroélectricité régulière, liée à la dissymétrie de structure.

Il est à remarquer cependant que la pyrite de fer et le cobalt gris, qui sont les seuls minéraux conducteurs qui possèdent l'hémiédrie à faces parallèles, sont aussi les seuls sur lesquels on ait trouvé deux classes de cristaux jouissant de propriétés thermoélectriques différentes. L'hémiédrie à faces parallèles paraît donc corrélative d'une certaine dissemblance dans les propriétés électriques, comme l'hémiédrie tétraédrique et l'hémiédrie plagièdre sont respectivement corrélatives de la pyroélectricité et du pouvoir rotatoire.

CHAPITRE XVI

DES SOURCES D'ÉLECTRICITÉ (SUITE)

ACTIONS MÉCANIQUES ET PHYSIQUES.

1006. **Frottement.** — Nous pouvons revenir maintenant avec plus de précision sur l'électricité de frottement, dont il a déjà été question dès le début de cet ouvrage et à propos des machines électriques. Le fait général établi jusqu'à présent est que le frottement de deux corps développe sur chacun d'eux des quantités égales d'électricités différentes.

Lorsque les corps frottés sont identiques, on ne parvient pas en général à les électriser; quand il se manifeste des traces d'électricité très-faibles, cela tient presque toujours à ce qu'il y avait pendant l'opération une certaine dissymétrie entre les deux corps, comme entre deux rubans de soie identiques placés en croix et qui sont ainsi frottés, l'un dans le sens de la longueur et l'autre dans le sens de la largeur. Avec la plupart des corps mauvais conducteurs, résine, verre, flanelle, soie, velours, liége, plumes d'oiseaux, on peut électriser par frottement deux morceaux de même nature; la moindre différence entre les températures établit un défaut de symétrie suffisant pour la manifestation de propriétés électriques différentes, et le corps le plus chaud prend en général de l'électricité négative. Quelques physiciens disent avoir quelquefois obtenu la même électricité sur les deux corps frottés, Bergman par exemple avec deux plumes d'oie, Faraday avec deux bandes de flanelle; mais il devait y avoir dans l'expérience des causes d'erreur inaperçues, telles

que des zones d'électricités différentes sur chacun des deux corps, parce qu'un pareil résultat serait en contradiction absolue avec l'ensemble des phénomènes observés.

1007. **Frottement des métaux.** — Considérons d'abord le frottement de deux corps conducteurs, deux métaux. L'électricité qui se produit alors n'atteint pas un potentiel élevé et ne donne pas à l'électroscope de déviation appréciable, mais on peut la mettre en évidence avec un galvanomètre. M. Becquerel (1) soudait à une plaque de métal, normalement à son plan, une tige reliée au fil d'un galvanomètre, et couvrait les points de jonction d'un bourrelet de mastic, afin d'éviter les actions thermoélectriques dues à l'échauffement des soudures. En posant l'une sur l'autre deux plaques semblables de métaux différents à la même température, il n'y avait aucun courant, mais le moindre frottement provoquait une déviation de l'aiguille.

M. Becquerel a formé une classification des métaux, d'après la facilité plus ou moins grande qu'ils avaient de prendre de l'électricité positive ou négative par frottement, et cette classification s'est trouvée presque identique à la liste qu'il avait donnée lui-même (942) pour les propriétés thermoélectriques des métaux; il paraît donc naturel d'admettre que les phénomènes soient de même nature, le frottement des plaques étant assez grand pour produire un échauffement sensible. Toutefois, M. Becquerel ne pense pas que le rôle du frottement se borne à un simple dégagement de chaleur. Pour appuyer son opinion, il fait remarquer qu'en frappant l'une contre l'autre et à coups redoublés des lames de bismuth et d'antimoine, sans frottement latéral, on n'obtient pas de courant appréciable. D'autre part, quand on frotte deux cylindres de fer et de cuivre, soit d'une manière quelconque, soit un même point du fer par une génératrice du cylindre de cuivre ou inversement, l'intensité du courant ne change pas, bien que les quantités de chaleur dégagées sur le point frotté sont très-différentes.

Ces deux expériences ne suffisent pas pour justifier l'interprétation de M. Becquerel. L'intensité du courant produit par l'échauffement de deux métaux dépend, non de la quantité totale

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXXVIII, p. 113.

de chaleur dégagée, mais uniquement de la température des surfaces en contact. Quand on frotte deux cylindres métalliques, la chaleur ne s'accumule guère au point de contact, même quand ce point ne change pas, et toute celle qui provient de frottements antérieurs au moment que l'on envisage se dissipe rapidement par conductibilité. Dans le cas de la percussion, le circuit n'est fermé que pendant un temps très-court à chacun des chocs et il n'est pas démontré que la température soit plus élevée que par le frottement.

1008. M. Gaugain (1) a montré par l'expérience suivante, qui paraît tout à fait démonstrative, que le frottement des métaux donne de véritables courants thermoélectriques.

Sur une lame de fer F (fig. 293) communiquant par un fil de

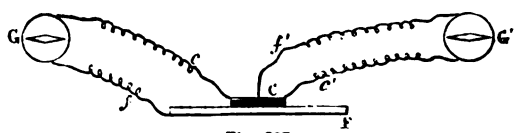


Fig. 293.

fer f avec un galvanomètre G, il frotte un petit disque de cuivre C relié au même galvanomètre par un fil de cuivre c; on obtient ainsi un courant dû au frottement des deux métaux. En même temps un fil de fer f', encastré dans l'axe du disque de cuivre et soudé sur la face inférieure, est relié au disque par un galvanomètre G', et constitue un couple thermoélectrique : le courant indiqué par ce galvanomètre dépend uniquement de la température acquise par la soudure pendant le frottement. La lame de fer et le disque de cuivre sont portés par des cadres en bois et dirigés par des tiges de bois, de manière à éliminer toute autre cause d'échauffement; on observe alors les déviations I et I' des aiguilles dans les deux galvanomètres.

L'équilibre de température s'établit assez rapidement entre le petit couple thermoélectrique et les surfaces frottées, mais non instantanément. Quand on accélère le frottement, la déviation I du premier galvanomètre croît plus rapidement que celle du se-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série. t. VI, p. 31.

cond, et elle diminue aussi moins vite quand le frottement se ralentit ; mais, en frottant d'une manière uniforme, les aiguilles arrivent bientôt à un état stationnaire.

On échauffe ensuite la plaque de fer et le couple en les plongeant dans de l'eau tiède à une température telle que la déviation du premier galvanomètre prenne encore la valeur I qu'elle avait acquise par le frottement ; on constate alors que la déviation I″ du second est très-voisine de I′. La différence I″ — I′ est tantôt positive, tantôt négative, mais toujours très-faible, et la moyenne d'un grand nombre d'observations s'est trouvée sensiblement nulle. Pour une même intensité de courant obtenu dans le premier galvanomètre G, par frottement ou par un échauffement direct, la température des surfaces en contact est donc exactement la même, et l'on est en droit d'en conclure que le dégagement de chaleur dû au frottement est la seule cause du courant électrique. Erman (1) avait déjà constaté que l'effet d'un frottement est toujours semblable à celui d'une addition de chaleur, mais il croyait voir dans le phénomène une vibration des molécules d'une forme particulière.

M. Becquerel a obtenu également des courants électriques en frottant un bouton métallique sur une lame du même métal. Avec le bismuth, l'antimoine, le fer et le platine, le bouton devient positif par rapport à la plaque ; l'inverse a lieu avec le cuivre, et de légères différences dans l'état des surfaces métalliques peuvent modifier beaucoup les résultats. Ce sont là des effets entièrement analogues aux courants thermoélectriques que l'on obtient par l'échauffement de deux portions d'un même métal qui se touchent, et l'influence des couches superficielles paraît de même ordre dans les deux cas.

1009. On peut aussi rendre sensible à un électroscope l'électricité produite par le frottement des métaux. Pour cela, Singer plaçait de la limaille de zinc dans une capsule de cuivre percée de trous. Tenant ensuite la capsule par un manche isolant, il tamisait la limaille de cuivre et la faisait tomber sur un plateau en communication avec un électroscope. M. Becquerel a reconnu qu'il vaut mieux maintenir le cuivre en communication avec le

(1) *Archives de l'électricité*, t. V, p. 477 (1845).

sol, pour qu'il soit constamment à l'état neutre; en outre, le crible est incommode à cause de la nécessité de le nettoyer souvent et peut être supprimé sans inconvénient. Il suffit de projeter la limaille sur une lame inclinée que l'on tient à la main, d'où elle tombe ensuite sur une plaque qui communique avec un électroscope très-sensible. M. Becquerel a constaté ainsi qu'une limaille métallique est généralement négative par rapport au métal lui-même, et que le frottement d'une limaille contre un métal différent donne à peu près les mêmes effets électriques que le contact direct des deux métaux : ainsi la limaille de cuivre est négative avec le zinc, le plomb, l'étain, le fer, le bismuth, l'antimoine, et sensiblement neutre avec le platine, l'or et l'argent. Le sens des résultats est celui que permettaient de prévoir les propriétés électriques des différents métaux. De même, les oxydes métalliques et les sulfures sont en général négatifs par rapport aux métaux correspondants. Dans le cas des limailles et des poussières, l'élévation de température due au frottement ne paraît pas jouer un rôle important dans le phénomène ; on ne doit y voir qu'un moyen simple de mettre en évidence l'électricité de contact entre les métaux. Nous avons déjà indiqué une expérience analogue de M. Thomson (891).

1010. **Frottement des corps isolants.** — Nous n'insisterons pas d'une manière particulière sur le frottement entre les corps mauvais conducteurs, parce que l'absence complète de conductibilité nuit beaucoup à l'étude des phénomènes. En général, on obtient alors une grande quantité d'électricité. Comme les surfaces directement en contact sont très-peu étendues et que l'électricité reste dans le voisinage des points où elle s'est développée, on doit en conclure que ce genre de contact donne lieu à des différences de potentiel considérables par rapport à celles qui se produisent entre les métaux. Les classifications que l'on peut établir entre les corps isolants, dont nous avons indiqué quelques exemples (13), n'ont d'ailleurs rien d'absolu et sont modifiées par une foule de circonstances.

1011. **Frottement des métaux avec les corps isolants.** — Le frottement des métaux avec les corps mauvais conducteurs se prête à une étude plus complète. Cavallo avait constaté que les métaux sont négatifs avec la plupart des substances, même la cire

d'Espagne; mais ce résultat n'est pas général. Haüy, en frottant les métaux avec une étoffe de laine, trouva l'argent, le plomb, le cuivre, le zinc, le bismuth positifs, et la plupart des autres métaux négatifs. Faraday (1), ayant frotté le fer, le cuivre, le laiton, l'étain, l'argent et le platine avec treize substances différentes, observa toujours que les métaux étaient négatifs, excepté avec le soufre qui parut les électriser tous positivement. Les résultats obtenus par différents physiciens présentent d'ailleurs de très-grandes divergences.

Nous avons déjà vu, à propos des machines électriques et des expérience de Péclet en particulier, que le frottement des métaux avec les corps mauvais conducteurs établit entre les surfaces en contact une différence de potentiel déterminée. Ce principe paraît tellement absolu que la plupart des circonstances qui peuvent modifier le contact, telles que la pression, la vitesse et la nature du frottement, n'altèrent pas la différence de potentiel. Nous trouverons encore à ce sujet, dans les travaux de M. Gaugain, plusieurs expériences intéressantes.

1012. M. Gaugain a cherché d'abord à classer les métaux d'après leurs propriétés électriques par rapport au frottement. Comme la plupart des métaux sont négatifs avec la gutta-percha et positifs avec le soufre, on conçoit qu'il est possible de mélanger le soufre et la gutta-percha en proportions convenables, de manière à obtenir des corps qui jouissent de toutes les propriétés électriques intermédiaires à celles de ces deux substances. Il suffit, pour cela, de frotter un disque de gutta-percha pendant un temps plus ou moins long avec de la fleur de soufre ou du soufre en canon. Les modifications que subit la gutta-percha par cette opération sont assez instables, et le frottement prolongé d'un métal ne tarderait pas à les détruire; mais il suffit qu'elles persistent assez longtemps pour que l'on puisse obtenir huit à dix fois les mêmes résultats.

Si, par le frottement de deux métaux A et B sur une même substance isolante, l'un d'eux A prend de l'électricité positive et l'autre B de l'électricité négative, on peut en tirer cette conséquence, au moins très-probable, que le premier métal A est po-

(1) *Experimental Researches*, t. II, p. 124.

sitif par rapport au second. M. Gaugain est parvenu, par une suite de tâtonnements, à dresser la liste suivante, dans laquelle chacun des corps est positif par rapport à ceux qui le suivent et négatif par rapport à ceux qui le précèdent.

Aluminium.
Gutta-percha n° 1.
Plomb, Cadmium, Zinc.
Gutta-percha n° 2.
Fer, Étain.
Gutta-percha n° 3.
Cuivre, Bismuth.
Gutta-percha n° 4.
Antimoine.
Caoutchouc vulcanisé.
Argent.
Gutta-percha n° 5.
Platine.
Gutta-percha n° 6.
Mercure, Or, Palladium.

La gutta-percha n° 6 était dans l'état où la fournit le commerce ; celle qui porte le n° 5 avait été recouverte d'une couche de vernis à la gomme laque, et les autres frottées plus ou moins longtemps avec du soufre. Ces différentes substances formaient des disques de 7 centimètres environ de diamètre. On les frottait avec des fils métalliques que l'on tenait à la main ; on déterminait ensuite l'état électrique du disque isolant, en posant sur sa surface un petit plateau de métal que l'on électrisait par influence, comme dans l'électrophore, puis on examinait l'état de ce plateau avec un électroscope.

1015. La liste de M. Gaugain présente une certaine analogie avec la classification des métaux au point de vue de l'électricité de contact (896), mais il s'y manifeste quelques inversions, en particulier pour le cuivre et le mercure. M. Gaugain a montré, en effet, que la méthode de classification des métaux par les corps isolants n'est pas rigoureuse ; ce genre de contact n'obéit pas à la loi de Volta et paraît plutôt comparable aux contacts des métaux avec les liquides, dans lesquels on rencontre aussi des cas d'inversion tout à fait de même ordre.

Ainsi Faraday a constaté que le couple formé par des lames de plomb et d'étain, plongées dans de l'acide azotique, a son pôle positif sur l'étain, tandis que, si l'on remplace l'acide azo-

tique par de l'acide chlorhydrique, c'est la lame de plomb qui forme le pôle positif. Ces expériences ne sont pas contradictoires ; elles prouvent seulement que les tensions de contact satisfont aux inégalités suivantes :

$$Pb\,|\,Sn + Sn\,|\,AzO^5 + AzO^5\,|\,Pb > 0,$$
$$Pb\,|\,Sn + Sn\,|\,HCl + HCl\,|\,Pb < 0,$$

lesquelles n'ont rien d'impossible, puisque ce genre de contacts n'obéit pas à la loi de Volta.

Le frottement des métaux contre les corps isolants peut donner des résultats analogues. Ainsi, dans les expériences de M. Gaugain, le fer prenait de l'électricité positive et le bismuth de l'électricité négative, par leur frottement sur un certain disque de gutta-percha soufré, de sorte qu'en désignant par G ce mélange, on avait pour les tensions de contact

$$Fe\,|\,G > 0 \quad \text{et} \quad G\,|\,Bi > 0.$$

Mais les mêmes métaux se comportaient d'une manière inverse par rapport à la gomme laque L, et l'on avait, au contraire,

$$Fe\,|\,L < 0 \quad \text{et} \quad L\,|\,Bi < 0.$$

Ces conditions ne sont pas encore contradictoires ; elles montrent de même que la loi de Volta n'est pas applicable, et que la méthode de classification employée ici par M. Gaugain ne peut que donner des indications probables pour ce qui concerne le contact des métaux entre eux.

1014. La difficulté de constater l'état électrique d'un corps mauvais conducteur ne permet guère de vérifier directement que le frottement de ces corps avec les métaux est caractérisé par une différence déterminée entre le potentiel du métal et celui de la couche isolante au point de contact ; mais plusieurs conséquences de ce principe sont vérifiées par expérience.

Ainsi, quand on frotte pendant longtemps un fil de zinc non isolé sur un disque de gomme laque, primitivement à l'état neutre, le zinc se charge d'électricité positive, et l'équilibre est établi lorsque le disque de gomme laque possède une certaine charge négative égale à — E. Si le disque est primitivement chargé d'électricité positive, ou d'une quantité d'électricité négative plus faible que E, le fil de métal prend encore de l'élec-

tricité positive, et le disque atteint au bout d'un temps plus ou moins long la même charge limite. Enfin, si le disque a d'abord une charge négative plus grande que E, le fil de métal s'électrise cette fois négativement, et ramène encore le disque à la même charge limite. L'état final des deux corps frottés est donc complétement indépendant de l'état initial, quand le fil est toujours à un potentiel nul.

Si le métal, au contraire, est maintenu dans deux expériences successives à des potentiels + V et — V, égaux et de signes contraires, et si le disque isolant est amené chaque fois à l'état de saturation, la charge de ce disque devra être augmentée dans le premier cas et diminuée dans le second d'une même quantité, de façon que la différence des potentiels des corps frottés reste la même. Pour le démontrer, M. Gaugain met un fil de platine en communication avec un grand condensateur et un électroscope A; puis, manœuvrant ce fil au moyen d'un manche isolant, il l'emploie à frotter d'une manière méthodique un disque de gomme laque, en y traçant des séries de lignes parallèles croisées, de manière à couvrir toute la surface. Il détermine enfin la charge du disque au moyen d'un plateau métallique, qu'il met ensuite en relation avec un électroscope à cadran B, préalablement ramené à l'état neutre. La divergence des feuilles permet d'évaluer, d'une manière approximative, le potentiel du plateau et, par suite, le potentiel du disque de gomme laque. Voici les résultats d'une pareille expérience :

	DÉVIATION DE L'ÉLECTROSCOPE A.	DÉVIATION DE L'ÉLECTROSCOPE B.
	—	—
1re expérience.	0	10°
2e expérience.	— 25°	6° = 10 — 4
3e expérience.	+ 25°	13° = 10 + 3

La charge limite du disque de gomme laque varie donc sensiblement comme le potentiel du métal frotté.

1015. Le procédé employé par M. Gaugain pour étudier l'électricité d'un disque isolant permet d'expliquer une expérience très-simple, qui a été l'objet d'une longue controverse entre Faraday et M. Riess. Si une lampe à alcool conductrice et non isolée est placée au-dessous d'un corps électrisé, positivement par

exemple, et qu'on fasse passer rapidement une lame de gomme laque entre la flamme et le corps influent, on trouve que cette lame est électrisée ; mais, pour l'explication du phénomène, il importe de savoir quelle est la nature de l'électricité, et sur quelle face elle est distribuée. M. Riess prenait l'électricité de ce gâteau en promenant un corps conducteur sur la surface, mais ce procédé est incorrect ; par l'emploi d'un disque, on reconnaît aisément que la lame de gomme laque est chargée d'électricité négative sur sa face inférieure. En effet, la flamme qui communique avec le sol se comporte comme une pointe infiniment aiguë, qui laisse échapper vers le corps électrisé un flux d'électricité contraire, et cette électricité se dépose au passage sur la face inférieure de la lame de gomme laque.

1016. **Frottement des liquides et des gaz.** — Le frottement des liquides avec les corps solides doit donner aussi de l'électricité, puisqu'il n'y a en tout ceci que des tensions de contact. L'éther, l'alcool, les résines liquides prennent de l'électricité négative quand on les verse sur du verre dépoli. L'expérience réussit mieux avec le mercure, comme nous l'avons déjà vu. Quand on plonge un bâton de verre ou de résine dans un bain de mercure isolé en communication avec un électroscope, on n'aperçoit pas de divergence des pailles, tant que le bâton est immergé, mais la divergence augmente peu à peu à mesure qu'on le retire, et le bâton est lui-même chargé d'électricité contraire.

L'emploi du mercure permet de démontrer, sous une autre forme, que la différence de potentiel due au frottement est constante. Remarquons, en effet, que si l'on frotte avec un corps isolant la surface intérieure d'un conducteur électrisé, ce corps se trouve, par sa position même, porté d'abord au potentiel du conducteur, et la différence de potentiel des surfaces frottées tiendra uniquement à la quantité d'électricité qui s'y développe. Si l'on enlève ensuite le corps isolant, toute l'électricité de frottement se portera à la surface du conducteur, et y produira une variation de potentiel constante, indépendante du potentiel primitif. Pour le démontrer, on plonge une baguette de verre dans un bain de mercure qui communique avec un électroscope électrisé négativement : la déviation des pailles n'est pas sensiblement modifiée. Quand on enlève la baguette, la déviation des

pailles augmente de la même quantité, pour de faibles déviations, que si le mercure eût été primitivement neutre.

Le mercure prend de l'électricité négative avec le verre, la résine, et de l'électricité positive avec le papier, la toile, la laine, le drap, la soie, le taffetas, les plumes à écrire, le feutre, l'ambre, la cire. Il est bon en général, pour ces expériences, de chauffer le mercure et même les corps qu'on y plonge. Avec un paquet de plumes d'oie plongé dans une éprouvette à mercure, on peut produire assez d'électricité pour tirer des étincelles du liquide. Nous avons déjà indiqué (12) l'expérience de la pluie de mercure qui est très-remarquable à ce point de vue.

Les poussières et les liquides pulvérulents, entraînés par un courant d'air, donnent aussi de l'électricité. Bennet, en projetant avec un soufflet de la craie en poudre sur le plateau d'un électroscope, obtint de l'électricité positive pour une distance de 12 centimètres, et de l'électricité négative pour la distance de 15 centimètres. L'expérience est, en effet, complexe, parce qu'il y a deux frottements, l'un entre le jet de gaz et le tuyau d'échappement, l'autre contre le plateau de l'électroscope, et il peut arriver que, suivant la distance du plateau à l'orifice, l'un ou l'autre soit prédominant. On sait, d'ailleurs, depuis les recherches de Faraday (842) à propos de la machine d'Armstrong, que tout l'effet est dû aux matières solides ou liquides entraînées par le courant gazeux, et que les gaz secs, ainsi que les vapeurs surchauffées, ne donnent pas d'électricité appréciable.

1017. **Division des corps.** — Toutes les opérations par lesquelles on détermine le contact de particules de natures différentes développent de l'électricité. Il suffit de couper par un corps tranchant, de limer ou de racler diverses substances, telles que la gomme laque, le soufre, la stéarine, la résine, la cire d'Espagne, le chocolat, etc., pour que les fragments en tombant sur un électroscope l'électrisent d'une manière sensible, quelquefois au point qu'on en puisse tirer une étincelle. Les fragments et les poussières ainsi obtenus sont le plus souvent électrisés positivement; toutefois les moindres modifications dans les conditions de l'expérience suffisent quelquefois pour changer les signes d'électricité. Ainsi, la cire à cacheter raclée avec un couteau dont le tranchant est émoussé donnera, par exemple, des

poussières positives, tandis que ces poussières seront négatives si le tranchant est finement aiguisé. Un changement dans la température de l'un des deux corps peut encore modifier les signes électriques. Ces phénomènes ont donné lieu à un nombre considérable d'observations souvent contradictoires et qui n'ont pas été reliées par une loi générale. Il semble résulter de l'ensemble des faits que la division même des corps ne joue aucun rôle dans la production d'électricité. Dans toutes les expériences, il y a en réalité frottement ou contact de deux substances différentes, au moins physiquement, et la cause de l'électricité doit être la même que pour le frottement.

1018. On avait remarqué depuis longtemps qu'une feuille de mica clivée dans l'obscurité devient souvent lumineuse. En soutenant chaque lame par un manche isolant collé au moyen d'un peu de mastic, M. Becquerel (1) a reconnu qu'elles emportent, en se séparant, des électricités de signes contraires. Le même phénomène se reproduit, quelque mince que soit la lame, et l'on serait porté à en conclure qu'il aurait lieu aussi dans la séparation des molécules. Lorsqu'une lame a été ainsi clivée, il suffit de rapprocher les morceaux et de les séparer de nouveau pour reproduire les mêmes effets électriques; mais cette propriété ne se conserve que peu d'instants après l'exfoliation, et elle renait quand on chauffe l'une des lames. Cette circonstance semble indiquer que la température joue un rôle important dans le phénomène; il n'est pas impossible qu'une petite différence de température entre les deux faces d'une lame de mica, avant le clivage, ne soit nécessaire à la réussite des expériences, car il faut bien qu'il y ait une différence physique entre les deux feuillets que l'on sépare, pour qu'il s'établisse entre eux une dissymétrie électrique. Le talc feuilleté du Saint-Gothard et le gypse transparent donnent par l'exfoliation des résultats semblables. Il suffit même de dédoubler une carte à jouer pour que les deux fragments soient électrisés en sens contraires : ici la dissymétrie est plus manifeste, parce que les deux feuillets de la carte n'ont généralement pas la même structure.

1019. **Pression.** — L'électricité produite par la pression pa-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXII, p. 5.

rait être un effet de même nature. Libes a reconnu qu'en pressant un disque de métal isolé sur une feuille de taffetas enduit de résine élastique, le métal acquiert de l'électricité négative et le taffetas de l'électricité positive, tandis que le frottement des deux corps les électrise en sens contraires. Haüy (1) trouva plus tard que la simple pression des doigts électrise un cristal de spath d'Islande, et que quelques autres substances minérales jouissent de la même propriété. Il a profité de cette expérience pour construire une *aiguille électroscopique*, formée d'un simple petit cristal de spath porté à l'extrémité d'une aiguille de métal, laquelle est suspendue par un fil de cocon ou posée sur une pointe où elle peut tourner librement. Quand on veut se servir de l'instrument, il suffit de presser légèrement le cristal entre les doigts : il devient positif et conserve même son électricité pendant très-longtemps.

Ce phénomène est beaucoup plus général que ne le pensait Haüy ; M. Becquerel a reconnu que deux corps quelconques pressés l'un contre l'autre, puis séparés rapidement, sont électrisés en sens contraires, pourvu que l'un au moins des deux ne soit pas conducteur, et que la quantité d'électricité est sensiblement proportionnelle à la pression. L'expérience réussit surtout avec des corps élastiques comme le liége, la moelle de sureau et le caoutchouc. Le signe de l'électricité dépend, bien entendu, de la nature des corps pressés : le liége est positif avec le caoutchouc, et négatif avec des substances minérales cristallisées comme le sulfate de chaux, le spath fluor, la baryte sulfatée, etc. Enfin, la température a une grande influence sur le phénomène : ainsi deux disques de liége identiques, ou deux cristaux de spath d'Islande, pressés l'un contre l'autre, ne donnent généralement pas de signes d'électricité ; mais, si l'un des disques ou des cristaux est légèrement chauffé, les deux corps pressés deviennent aussitôt électriques en sens contraires.

Lorsque deux corps sont fortement comprimés l'un contre l'autre, il se dégage de la chaleur sur les surfaces en contact ; cette chaleur due à la pression se dissipe rapidement, parce que l'expérience dure toujours un temps assez long, mais la décom-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. V, p. 95.

pression est brusque, et il en résulte, au moment où les corps sont séparés, une différence de température assez grande entre les deux surfaces en contact. Il y a donc réellement contact de deux substances différentes à des températures très-inégales. On conçoit, d'après cela, que les effets soient surtout marqués avec les corps élastiques, que la quantité d'électricité augmente avec la pression, et enfin que l'électrisation des deux corps par pression, non-seulement soit plus grande que par le simple contact ou le frottement des mêmes corps, mais puisse encore donner lieu à des signes différents, puisque les conditions de température sont complétement modifiées.

1020. **Passage des corps à l'état solide.** — Quelques expériences semblent indiquer aussi que la solidification d'un corps produit de l'électricité. Quand du soufre fondu se solidifie dans un verre, le soufre et le vase s'électrisent en sens contraires (11); il en est de même pour le chocolat et l'acide phosphorique. Gay-Lussac a remarqué que l'adhérence des corps entre eux d'abord, puis leur séparation par l'inégalité de retrait, comme cela a lieu entre le verre et le soufre, sont les conditions indispensables pour que l'on obtienne de l'électricité après la solidification d'un corps, et il attribue les effets électriques à la désagrégation moléculaire. Ainsi les métaux, qui ne remplissent pas cette condition, n'en manifestent aucune trace après s'être solidifiés dans du verre. L'expérience est évidemment trop complexe pour que l'on puisse y indiquer d'une manière précise la cause des phénomènes électriques.

On a souvent attribué à la production d'électricité la phosphorescence qui se manifeste dans la cristallisation de certains corps, comme l'acide arsénieux, les sulfates de potasse et de soude, et d'autres sels encore. On pourrait aussi faire rentrer dans le même cas la plupart des phénomènes de phosphorescence, au moins lorsque les lueurs ne sont accompagnées d'aucune action chimique; mais ce sont là de simples conjectures que l'observation directe n'a pas encore confirmées.

1021. **Actions moléculaires.** — Enfin, toutes les actions mécaniques auxquelles on soumet un corps paraissent propres à développer de l'électricité. Peltier mit en rapport avec un galvanomètre un grand cercle formé de cuivre non recuit qu'il plaça

alternativement dans le méridien magnétique, dans un plan perpendiculaire à ce méridien, ou dans une position intermédiaire, afin de pouvoir tenir compte de l'induction produite sur ce cadre par la terre. L'équilibre de température étant bien établi et l'aiguille du galvanomètre au zéro, Peltier déforma une partie quelconque du fil et reconnut qu'il se produisait à chaque flexion un courant électrique momentané. La direction du courant étant indépendante de la position du fil par rapport au méridien magnétique, l'effet était dû aux changements d'état moléculaire dans l'intérieur du métal; il suffisait d'ailleurs de frotter le fil entre les doigts ou avec du drap, ou de le tirer à la filière, pour provoquer un courant appréciable.

Sullivan [1] obtint de même un courant très-faible à l'aide d'un fil formé de deux bouts consécutifs, l'un de laiton et l'autre de fer, qu'il mettait en vibration, après l'avoir tendu de manière à lui faire rendre un son musical. L'effet était plus prononcé avec un barreau de bismuth, soudé à un barreau d'antimoine, que l'on frappait avec un morceau de fer pour le faire vibrer. Dans les deux cas, le courant cesse immédiatement avec la vibration. On ne peut pas en conclure que les effets observés ne soient pas des courants thermoélectriques, parce que les changements de température qui se produisent en différents points d'une masse métallique soumise à des opérations mécaniques, comme celles que produisent les vibrations, sont généralement très-faibles et se dissipent rapidement si on ne les entretient pas d'une manière continue. Ces expériences, et toutes celles que l'on pourrait citer encore dans le même genre, ne prouvent donc pas que l'on ait affaire à un nouvel ordre de phénomènes.

ÉVAPORATION.

1022. **Expériences de De Saussure.** — L'abbé Nollet et Priestley avaient essayé déjà de déterminer par expérience si l'évaporation des liquides est une source d'électricité. Cette question présente un grand intérêt parce qu'on peut y trouver la source de

[1] *Archives de l'Électricité*, t. V, p. 480 (1845).

l'électricité atmosphérique. Volta avait cru, en s'appuyant sur quelques expériences un peu incomplètes, pouvoir établir comme règle générale que la vapeur qui se dégage de l'eau est électrisée positivement, le liquide lui-même négativement, d'où résulterait une explication très-simple de l'électricité positive qui paraît exister dans l'atmosphère. De Saussure (1) fit à ce sujet un grand nombre d'expériences remarquables. Après plusieurs essais pour obtenir une formation rapide de vapeurs, afin d'éviter que l'électricité ne se dissipe entièrement par déperdition, ce qui doit avoir lieu dans le cas d'une évaporation lente, De Saussure adopta la disposition suivante. Un creuset de métal, étant chauffé au rouge vif, fut mis en communication avec un électromètre; il y laissa tomber une petite quantité d'eau distillée, nota la durée de l'évaporation, l'état électrique du creuset, et répéta successivement la même expérience un grand nombre de fois, jusqu'à ce que le creuset fût presque entièrement refroidi. Les premières gouttes s'évaporent lentement parce qu'elles prennent l'état sphéroïdal, puis l'évaporation devient plus rapide et s'effectue avec décrépitation en produisant un nuage visible, et enfin elle devient de nouveau beaucoup plus lente à mesure que la température du creuset diminue.

Avec un creuset en fer les résultats ne furent pas constants : l'électricité du creuset fut tantôt de signe variable aux différentes expériences d'une même série, tantôt constamment positive. Un creuset de cuivre devint aussi positif. Dans ces deux cas, le maximum d'électricité ne correspondait pas en général au moment où l'évaporation était le plus rapide. Avec un creuset d'argent et une tasse de porcelaine, l'électromètre fut toujours négatif, par conséquent la vapeur positive, et le maximum d'électricité correspondait exactement au moment de la plus rapide évaporation. L'alcool et l'éther produisirent aussi de l'électricité négative sur le creuset d'argent. Enfin, il en fut de même avec de l'eau projetée sur des charbons ardents.

Toutefois, De Saussure n'obtint pas d'électricité en chauffant une plaque de fer blanc couverte de terre humide; il crut même remarquer que la forme du vase dans lequel on met le liquide

(1) *Voyage dans les Alpes*, t. II, § 805 à 829.

joue un certain rôle dans le phénomène, car en faisant bouillir la même quantité d'eau dans une cafetière ou dans une casserole évasée, il obtenait de l'électricité dans le premier cas et non dans le second.

1023. **Expériences de Pouillet.** — Ces expériences ont été reprises par Pouillet (1) à l'aide d'une méthode à peu près identique à celle qu'avait employée De Saussure. Une petite plaque de laiton mince est mise en communication par un fil métallique avec un électroscope ordinaire, ou avec l'un des plateaux d'un électroscope condensateur dont l'autre plateau est relié avec le sol. Un creuset de platine à parois très-épaisses, pour que le refroidissement soit moins rapide, est chauffé au rouge blanc, puis posé sur la plaque de laiton, et on y laisse tomber quelques gouttes du liquide à étudier. Si le liquide s'évapore d'une manière complète en conservant l'état sphéroïral, il ne se produit dans tous les cas que des traces d'électricité à peine sensibles; mais, quand la température s'abaisse au-dessous du rouge, l'évaporation devient violente, le liquide est projeté de toutes parts et l'électrisation est généralement très-manifeste.

Avec l'eau pure, l'acide acétique pur et cristallisable, les acides azotique et sulfurique parfaitement purs et concentrés, on n'obtient aucune trace d'électricité, quelle que soit la forme suivant laquelle s'effectue l'évaporation.

Avec une solution de strontiane, de chaux, de baryte, de soude, de potasse, etc., le creuset se charge d'électricité positive au moment de l'évaporation brusque. L'ammoniaque, au contraire, donne au creuset de l'électricité négative.

L'électricité du creuset est encore négative quand on y projette de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, ou de l'acide acétique étendu d'eau, ou une dissolution de sels quelconques, carbonates, nitrates, sulfates, acétates, etc.

Pouillet déduit de ces expériences les conséquences suivantes:

1° Le changement d'état d'un corps ne donne jamais le moindre signe d'électricité;

2° Dans l'évaporation des solutions alcalines, l'eau est négative et l'alcali positif. La contradiction qui semble exister pour

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXXVI, p. 5.

l'ammoniaque s'explique par ce fait que l'alcali est alors plus volatil que l'eau, de sorte que l'électrisation du creuset correspond à l'électrisation de l'eau.

3° La ségrégation chimique qui accompagne l'évaporation des solutions acides ou salines produit de l'électricité positive sur la vapeur, et négative sur la solution.

On voit de suite l'application de ces résultats à l'évaporation de l'eau de la mer et les conséquences qui en résultent pour l'électricité atmosphérique.

1024. **L'évaporation n'est pas une source d'électricité.** — Toutefois, il paraît démontré aujourd'hui que l'origine de l'électricité, dans les expériences qui précèdent, ne doit être attribuée ni à la simple formation de vapeurs, ni à la ségrégation chimique qui accompagne l'évaporation des dissolutions. Faraday avait déjà reconnu, dans ses recherches sur la machine hydroélectrique, que la simple évaporation d'une eau quelconque ni la condensation des vapeurs ne produisent aucune trace d'électricité, qu'il en est de même pour le frottement des gaz purs et de la vapeur sèche, qu'enfin un jet de vapeur ou de gaz ne s'électrise que s'il contient en suspension soit des gouttelettes liquides, soit des parcelles de matières solides.

Reich [1] a reconnu aussi que, dans les expériences de Pouillet avec le creuset incandescent, le signe de l'électricité dépend de la nature du métal et des matières étrangères solides qu'on y introduit, de sorte que l'électrisation doit être attribuée au frottement des gouttelettes liquides.

Si l'électricité était liée à la formation des vapeurs, il devrait s'établir, comme dans tous les phénomènes analogues, une différence de potentiel déterminée entre le liquide et la vapeur, et l'emploi d'un condensateur devrait permettre de recueillir une quantité d'électricité beaucoup plus grande. M. Gaugain [2] a montré, au contraire, que le phénomène est graduel, et que la quantité d'électricité recueillie est indépendante de la grandeur des surfaces qui la reçoivent, de sorte que la divergence des pailles est beaucoup moindre avec un électroscope condensateur qu'avec un électroscope ordinaire.

(1) Riess, *Reibungselektricität*, Bd. II, p. 407.
(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXIX, p. 231.

Les frottements produits par le pétillement du liquide sont d'ailleurs très-complexes, car ils ont lieu entre le liquide et les parois du creuset, entre le liquide et les dépôts qui tapissent ces parois, ou encore entre le vase et les poussières projetées en dehors. Les électricités que le vase reçoit de ces divers frottements sont tout à fait indépendantes, de sorte que le signe électrique final, dans des conditions en apparence identiques, peut être variable d'une expérience à l'autre. Le frottement des gouttelettes liquides contre les dépôts salins paraît en général prédominant: en effet, la quantité d'électricité va constamment en croissant lorsque, répétant plusieurs expériences successives, on a soin de ne pas nettoyer le creuset et de laisser la croûte de dépôt augmenter de plus en plus. La nature du vase n'a alors aucune influence, et l'on observe exactement les mêmes phénomènes en laissant tomber quelques gouttes d'eau pure ou de dissolution saline sur un culot de sel solide fortement chauffé, qui communique avec l'électroscope. Les résultats sont beaucoup moins simples que ne l'avait cru Pouillet.

Ainsi le creuset est positif quand on y projette des solutions alcalines, de potasse, soude, baryte, strontiane et chaux; des dissolutions de sulfate et de carbonate de potasse.

Les acides azotique, sulfurique et acétique concentrés ne donnent aucune trace d'électricité.

Au contraire, le creuset devient négatif, à un degré variable avec la nature des corps, quand on y projette des solutions étendues d'acide sulfurique ou azotique; de l'acide chlorhydrique; des dissolutions d'acide phosphorique ou borique; de sel marin, de sulfates de soude et de magnésie; de phosphate et de borate de soude; d'azotates de potasse, de soude, de baryte et de strontiane; de chlorate de potasse, etc.

Il n'y a donc qu'une relation assez éloignée entre le signe de l'électricité produite et le rôle chimique des corps qui entrent dans ces dissolutions.

Les expériences plus récentes, par lesquelles on a cherché aussi à manifester la production d'électricité par évaporation lente au soleil, ne sont pas non plus de nature à mettre hors de doute l'existence du phénomène.

PHÉNOMÈNES CHIMIQUES.

1025. **Dégagement des gaz.** — Les réactions qui s'effectuent soit entre les liquides, soit entre les liquides et les corps solides, sont toujours accompagnées d'un développement d'électricité ; mais nous n'avons pas à revenir ici sur ces phénomènes qui rentrent dans les effets du contact que nous avons suffisamment étudiés. Il nous reste à considérer les cas où les actions chimiques donnent lieu à un dégagement de gaz, soit à la température ordinaire, comme dans la préparation de l'hydrogène par un acide et un métal, soit à une température plus élevée, comme dans la combustion des flammes.

Lavoisier et Laplace (1) mirent de la limaille de fer dans un bocal à large ouverture en communication avec un électroscope condensateur. Ayant versé de l'acide sulfurique étendu sur la limaille, il y eut une vive effervescence avec dégagement abondant d'hydrogène et, au bout de quelques minutes, le condensateur fut tellement électrisé qu'on en put tirer une assez vive étincelle. Dans cette circonstance, le liquide avait pris de l'électricité négative. L'action de l'acide sulfurique sur le carbonate de chaux et celle de l'acide nitrique sur le fer donnèrent exactement les mêmes signes électriques, avec moins d'intensité.

1026. **Combustion.** — Lavoisier et Laplace firent la même expérience avec des réchauds remplis de charbon allumé, et reconnurent que l'électroscope condensateur se chargeait aussi d'une grande quantité d'électricité négative. Des expériences analogues, répétées ensuite par différents physiciens, ont donné souvent des résultats contradictoires. Pouillet (2) a repris l'étude de ce phénomène et indiqué les précautions que l'on doit prendre si l'on veut obtenir des effets constants. Pour recueillir l'électricité de l'acide carbonique qui provient de la combustion du charbon, Pouillet prend un charbon d'un gros diamètre taillé en cylindre, et, après avoir allumé la base supérieure,

(1) *Mémoires de l'Académie des sciences* (1781), p. 292.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXXV, p. 401.

il le place verticalement à 6 ou 8 centimètres au-dessous d'une plaque de laiton qui communique avec l'un des plateaux de l'électroscope condensateur. Au bout de quelques instants, l'appareil est électrisé et indique que l'acide carbonique est positif. L'expérience réussit moins bien si le charbon est allumé sur sa surface latérale, sans doute parce que l'acide qui se dégage lèche ensuite le charbon après s'être refroidi. Pour observer l'électricité du charbon lui-même, il suffit de le placer sur l'un des plateaux du condensateur, d'allumer sa base supérieure et d'entretenir la combustion par un petit courant d'air ou d'oxygène. On obtient en quelques secondes une électrisation négative du plateau correspondant.

Il faut avoir soin, dans toutes ces expériences, de produire la combustion loin de tout corps électrisé et dans une atmosphère où aucune machine électrique n'a fonctionné depuis quelque temps, car une colonne de gaz chauds joue le rôle de pointes à un très-haut degré, comme nous l'avons déjà vu, et l'influence des corps étrangers pourrait dominer le phénomène de la combustion elle-même. Cette observation s'applique, à plus forte raison, à l'étude des flammes.

1027. Pour déterminer l'électricité produite par la combustion de l'hydrogène, par exemple, Pouillet enflamme un jet abondant de ce gaz qui s'échappe par un tube de verre vertical, de manière à donner une flamme de 3 pouces de hauteur, et il en approche une hélice de platine communiquant avec un des plateaux de l'électroscope condensateur. Dès que l'hélice est à 10 millimètres de la flamme, elle s'électrise positivement; la charge augmente d'abord à mesure que la distance diminue, puis les signes électriques deviennent incertains quand la flamme touche l'hélice. La flamme paraît donc entourée d'une atmosphère d'électricité positive. Si l'on veut obtenir l'état électrique du gaz lui-même, on peut plonger dans l'intérieur de la flamme une petite hélice de platine, ou faire brûler le gaz à l'extrémité d'un tube de métal isolé qui communique avec l'électroscope : dans les deux cas, on recueille de l'électricité négative. Il semble résulter de là que, dans les phénomènes de combustion à l'air, le corps combustible se charge d'électricité négative et les produits de la combustion d'électricité positive.

1028. Toutefois l'expérience est en réalité beaucoup moins simple qu'elle ne le paraît. L'introduction d'un corps étranger dans la flamme pour y récolter l'électricité peut jouer un rôle important, s'il n'est pas la cause principale du phénomène. M. Becquerel avait déjà déterminé l'état électrique des flammes en y introduisant des fils de métal comme sondes et conclu de ses expériences qu'il s'y produisait, par suite de la température inégale de deux sondes, de véritables courants thermoélectriques.

Plusieurs physiciens, en particulier MM. Becquerel, Buff, Grove, Matteucci, Gaugain et Hankel, ont étudié ce phénomène sous toutes les formes. De l'ensemble de leurs travaux on peut conclure que, dans un grand nombre de cas au moins, l'ensemble de deux sondes métalliques plongées dans une flamme constitue un véritable couple thermoélectrique, dans lequel les gaz chauds interviennent comme un conducteur, pour établir une communication entre deux métaux à des températures très-différentes. M. Hankel (1), par exemple, plongeait dans la flamme d'une lampe à alcool isolée deux fils métalliques entourés de tubes de verre, sauf à leur extrémité, et il évaluait par un électromètre à feuilles d'or la différence de potentiel de ces deux fils; il est arrivé aux conclusions suivantes :

Si l'un des fils est placé dans l'alcool, et un autre fil de même nature au-dessus, à côté ou dans l'intérieur de la flamme, il s'établit entre les fils une différence de potentiel déterminée, comme entre les deux pôles d'un couple voltaïque; cette différence de potentiel varie considérablement quand on change la distance du second fil à l'extrémité de la mèche. Si les deux fils sont situés dans la flamme, le plus chaud est toujours au potentiel le plus élevé, et la différence devient nulle lorsqu'ils ont la même température. La combustion n'y joue aucun rôle, car il suffit de remplacer le conducteur supérieur par un creuset de platine renfermant de la glace, ou par une veine liquide, pour voir aussitôt disparaître toute variation de potentiel due au déplacement de ces conducteurs par rapport à la flamme.

On peut d'ailleurs remplacer l'électromètre par un galvanomètre à grande résistance (M. Grove) pour observer les mêmes

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LIX, p. 481.

phénomènes. Avec cette disposition, l'intensité du courant dépend, non-seulement de la force électromotrice, mais aussi de la résistance du gaz et, par suite, de la distance des deux sondes, de sorte que les résultats ne sont pas aussi directement comparables.

1029. **Couples à gaz thermoélectriques.** — On ne doit pas négliger cependant le rôle du gaz et les forces électromotrices qui peuvent se manifester au contact des deux métaux qui servent de sondes avec les gaz de natures différentes dans lesquels ils sont plongés, comme pour le couple à gaz de Grove (912); M. Matteucci croit que la polarisati o des métaux par les gaz est une des causes principales du développement d'électricité. Une ancienne expérience de M. Becquerel permet, en effet, d'envisager la question sous un autre point de vue. Un tube de verre, fermé à l'une de ses extrémités, renferme un fil de platine qui communique avec l'un des plateaux de l'électroscope condensateur. Autour de l'extrémité fermée du tube on enroule un autre fil de platine communiquant avec le sol, et on chauffe cette extrémité avec une lampe à alcool : le condensateur s'électrise très-rapidement aussitôt que le verre est porté à une température assez élevée pour qu'il commence à se ramollir. Les deux fils de platine sont alors à des potentiels différents, et il se produit dans l'appareil une force électromotrice comme avec un couple électrique. La série des contacts paraît cependant ne présenter aucune dissymétrie, si l'on ne tient compte que des fils et du verre, et la différence des températures des deux métaux ne paraît pas suffisante pour expliquer le phénomène; mais il faut remarquer que le fil extérieur et la surface du verre correspondante sont plongés dans les gaz de la flamme, lesquels sont éminemment carburés, tandis que le métal et le verre restent dans l'intérieur en contact avec l'air que le tube renfermait primitivement.

1030. Pour démontrer que c'est là l'origine de la force électromotrice, M. Gaugain [1] introduit quelques gouttes d'alcool dans le tube, avant de faire l'expérience, et constate alors que toute électricité disparaît, les deux fils de platine étant entourés par des gaz de même nature.

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXVII, p. 584.

Une autre manière de faire l'expérience consiste à prendre deux tubes de verre A et B bouchés à l'une des extrémités et renfermant des fils de platine *a* et *b*, le premier communiquant avec l'un des plateaux A′ de l'électroscope et l'autre avec le sol. On met quelques gouttes d'alcool dans le tube A et on chauffe avec une lampe les deux bouts fermés et rapprochés l'un de l'autre. Le deuxième plateau de l'électroscope ayant été maintenu isolé, on le fait communiquer quelques secondes avec le sol, et on supprime les communications : le plateau A′ est chargé d'électricité négative. Le fil de platine du tube à air donnerait de même de l'électricité positive. Pour prouver que la combustion de l'alcool ne joue aucun rôle, on chauffe les tubes d'abord et on n'établit la communication du deuxième plateau qu'après avoir enlevé la lampe ; les résultats sont les mêmes. Comme les charges électriques sont très-faibles, il est utile d'employer un électroscope à double condensation.

L'expérience ne réussit que lorsque l'un des tubes renferme de l'oxygène ou de l'air, l'autre tube contenant un gaz non comburant quelconque, azote, acide carbonique, hydrogène, vapeurs d'eau, d'alcool, d'éther, etc. ; le fil du tube à oxygène est toujours positif, et la nature de l'autre gaz ne paraît pas influer sur la charge. De même, la nature du métal semble indifférente et l'expérience réussit aussi bien avec le cuivre. L'effet paraît donc dû au contact de l'oxygène et du verre à une température voisine du ramollissement, et il est sans doute accompagné d'une action chimique, telle qu'une oxydation du verre.

Cet appareil présente d'ailleurs tous les caractères d'un véritable couple caractérisé par une force électromotrice déterminée ; car il donne à un condensateur sa charge maximum en un temps très-court, la quantité d'électricité est proportionnelle à la surface du condensateur ou à sa force condensante, et trois couples semblables disposés en tension ont produit une quantité d'électricité beaucoup plus grande qu'un seul couple. Les deux fils peuvent encore être réunis à un galvanomètre et produire un courant électrique.

Voici quelques expériences différentes qui conduisent aux mêmes conclusions. Si l'un des fils est formé d'un métal oxydable plongé dans l'air, le gaz qui l'entoure se modifie peu à peu et

l'état électrique final n'est pas le même qu'au début. Lorsque les deux fils sont en fer, il ne se produit rien, ce qui se conçoit d'après la symétrie du couple. Avec un fil de fer et un fil de platine dans des tubes à air, on obtient d'abord sur le fer de grandes quantités d'électricité négative qui diminuent peu à peu et finissent par disparaître. Si alors, le fer étant isolé, on relie le tube qui le contient à l'électroscope, on obtient de même de grandes charges négatives. Ce sont là de véritables couples formés de plusieurs contacts successifs, dont quelques-uns ont lieu entre les gaz et les métaux ou le verre.

1031. Les couples pyroélectriques de M. Becquerel se rattachent à la même propriété, et nous les citerons ici, à la suite des couples à gaz, à cause du rôle que joue dans les deux cas le verre ramolli par la chaleur. Deux fils, l'un de fer et l'autre de cuivre, communiquant avec un galvanomètre, ne produisent aucun courant quand on les plonge en même temps dans un foyer à une température très-élevée, si l'on a soin que les fils ne se touchent pas. Il est probable qu'en réalité le courant n'est pas absolument nul et qu'on pourrait l'observer avec un galvanomètre à très-long fil, mais l'intensité doit être très-faible à cause de la grande résistance électrique du gaz. Si l'un des fils est entouré d'un tube de verre contre lequel l'autre fil est appliqué, il se produit un courant allant du fer au cuivre au travers du verre. On arrive au même résultat d'une manière plus simple en plaçant un fil de cuivre dans un tube de verre vert, et celui-ci dans un canon de fusil bourré de verre pilé ; on place ensuite le canon de fusil au milieu d'un foyer.

Toutefois, on ne peut pas conclure de cette seule expérience que les tensions de contact du verre fondu avec les métaux n'obéissent pas à la loi de Volta. L'échauffement d'une soudure fer et cuivre donne bien un courant thermoélectrique allant du cuivre au fer à travers la soudure, mais il se produit une inversion à la température du rouge, d'après les expériences de M. Becquerel, et il faudrait démontrer que la force électromotrice est alors différente de celle que l'on obtient par l'interposition du verre fondu, pour savoir si les couples pyroélectriques de M. Becquerel doivent être comparés aux couples thermoélectriques ordinaires ou aux couples hydroélectriques.

En résumé, on peut considérer comme démontré que les contacts des gaz avec les corps solides ou liquides, et sans doute aussi le contact des gaz entre eux, donnent lieu à des différences de potentiel. Ces phénomènes n'obéissent pas, en général, à la loi des tensions et peuvent être comparés à ceux que donnent les couples à liquides. Il semble en résulter aussi que les effets électriques attribués à la combustion doivent également être rapportés à l'électricité de contact.

ÉLECTRICITÉ PHYSIOLOGIQUE.

1052. **Courant propre de la grenouille.** — Nous avons vu que plusieurs des expériences de Galvani paraissent démontrer l'existence d'une force électromotrice dans les membres d'une grenouille, indépendamment de tout contact avec une substance métallique, de sorte que si l'on réunit un muscle et le nerf correspondant par un circuit qui n'introduise pas de contact nouveau, ce circuit est traversé par un courant électrique.

Nobili [1] a démontré cette propriété de la manière suivante. Deux verres contenant de l'eau distillée et communiquant avec un galvanomètre sont réunis par une patte de grenouille récemment sacrifiée, dont les muscles plongent dans l'un des vases et les nerfs lombaires dans l'autre vase. L'aiguille est déviée et indique un courant qui va du nerf aux membres par le circuit extérieur. Nobili construisit ainsi une pile formée de plusieurs grenouilles semblables disposées en tension et obtint un courant d'autant plus intense que le nombre de couples était plus grand. On peut même manifester cette électricité par des contractions musculaires ; il suffit de réunir séparément les nerfs et les muscles d'une grenouille convenablement préparée à deux points différents du nerf d'une autre grenouille, pour provoquer des secousses à chaque établissement ou suppression du contact.

L'expérience de Galvani était encore plus simple, puisqu'il déterminait des contractions en réunissant par un fil d'or ou par un morceau de muscle les pattes de la grenouille avec les nerfs

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXXVIII, p. 225.

lombaires, ou même en touchant directement le nerf par le muscle ; dans ce cas, l'organe producteur d'électricité servait en même temps d'électroscope.

1033. Dans toutes les expériences de cette nature, l'emploi des fils métalliques pour toucher différents points d'un organe imprégné de liquide peut causer des erreurs graves, et il est nécessaire d'éliminer le phénomène de polarisation des électrodes. M. Du Bois-Reymond prend, par exemple, deux petits augets en zinc contenant des solutions saturées de sulfate de zinc parfaitement pur ; sur le bord de ces vases sont placés des paquets de bandes de papier à filtrer régulièrement taillées et serrées par des lanières de caoutchouc. Ces bandes sont imprégnées de sulfate de zinc. Les deux augets communiquant avec un galvanomètre à très-grande résistance, on réunit les deux paquets par des bandes de papier également imprégnées de sulfate de zinc : le courant doit être nul. S'il se manifeste d'abord une petite déviation de l'aiguille, par suite d'une dissymétrie dans l'appareil ou d'un défaut d'équilibre dans les températures, on attend que l'aiguille revienne au zéro. Alors on enlève les bandes mobiles et l'on réunit les paquets par les organes que l'on veut étudier. Un moyen plus simple encore d'éviter la polarisation des électrodes est de munir les fils du galvanomètre de deux lames de zinc protégées par des tubes de verre, et terminées par des bourrelets d'argile plastique imprégnée de sulfate de zinc ; on peut donner à cette argile une forme quelconque et s'en servir pour toucher les deux points entre lesquels on veut manifester une différence de potentiel.

1034. **Propriétés du cylindre nerveux ou musculaire.** — L'électricité animale a donné lieu à un grand nombre de travaux que nous ne pouvons pas analyser ici ; nous résumerons seulement quelques-uns des faits principaux.

Les expériences que l'on réalise, soit avec un animal entier, soit avec un membre dont on conserve en même temps les muscles et les nerfs, correspondent en réalité à un phénomène complexe, dans lequel chacun des organes élémentaires intervient pour une part. Considérons d'abord un cylindre musculaire ou nerveux PQP'Q' (fig. 294), dont les bases sont formées par des sections artificielles perpendiculaires à la direction des fibres, et dont les faces latérales sont parallèles aux fibres. Les résultats

que l'on obtient en étudiant un pareil organe suivent toujours la même marche, quelles que soient les dimensions du cylindre, que la surface latérale soit naturelle ou artificielle ; on est donc autorisé à conclure que les propriétés du cylindre musculaire ou nerveux ne sont que la traduction et la multiplication des propriétés inhérentes aux fibres élémentaires des muscles et des nerfs. Appelons *équateur* de ce cylindre le cercle CD déterminé sur la surface par un plan perpendiculaire au milieu des arêtes, et *pôles* les extrémités A et B de l'axe. Si l'on réunit par un circuit extérieur deux points quelconques M et N situés dans un plan passant par l'axe, il se produit en général un courant, à moins que les deux points touchés ne soient symétriquement placés par rapport à l'équateur ou à l'axe. La loi du phénomène est très-simple : le courant va toujours par le fil extérieur vers celui des deux points touchés qui est le plus rapproché de l'un des pôles. L'intensité de ce courant est variable avec la position et la distance des points touchés : elle est maximum quand l'un des points est sur l'équateur et l'autre sur un pôle.

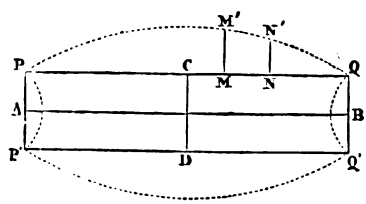


Fig. 294.

Le potentiel est donc variable aux différents points de la surface du muscle, maximum sur l'équateur, minimum aux deux extrémités de l'axe, et il varie dans l'intervalle d'une manière continue. On peut représenter la valeur du potentiel en chaque point par une normale à la surface comptée positivement vers l'extérieur; si l'on admet, par exemple, que le potentiel soit nul sur le pourtour des deux bases, on obtiendra ainsi une courbe comme celle qui est pointillée sur la figure. La force électromotrice du courant que l'on obtiendra en réunissant par un fil deux points quelconques M et N sera proportionnelle à la différence algébrique des ordonnées correspondantes MM' et NN' de la courbe des potentiels.

L'intensité du courant nerveux ou musculaire dépend encore des dimensions du tronçon que l'on examine : elle croît avec le diamètre et avec la longueur.

Si l'une des extrémités du muscle conserve la portion tendi-

neuse qui la termine, cette extrémité, quand on examine le muscle aussi frais que possible, se comporte comme la surface longitudinale : elle est positive par rapport à une section transversale. L'extrémité tendineuse est même d'abord positive par rapport à la surface longitudinale; mais, au bout de quelque temps, son potentiel diminue et elle finit par se comporter comme une section transversale artificielle.

1035. Les résultats dépendent d'ailleurs, non-seulement de la structure de l'organe, mais de la forme même du fragment qui sert aux expériences. Quand on coupe un muscle cylindrique par deux plans parallèles entre eux, mais obliques sur la direction des fibres, on obtient un cylindre oblique dont la section par un plan méridien perpendiculaire aux bases est un parallélogramme PQP'Q' (fig. 295). La distribution des potentiels n'est plus la même que pour le cylindre précédent : on obtient un courant, par exemple, quand on réunit deux points situés sur la base à égale distance de l'axe, et ce courant va de l'angle obtus vers l'angle aigu par le fil extérieur. Le potentiel minimum n'a pas lieu à l'extrémité A de l'axe, mais en un point A' situé entre cette extrémité et le sommet le plus aigu, et la droite CD qui joint les points à potentiel maximum n'est plus normale à l'axe. La courbe de distribution des potentiels à la surface aura une forme analogue à celle qui est représentée en pointillé sur la figure; on voit bien, d'après cette courbe, quel sera le sens du courant que l'on obtiendra en réunissant deux points quelconques par un circuit extérieur.

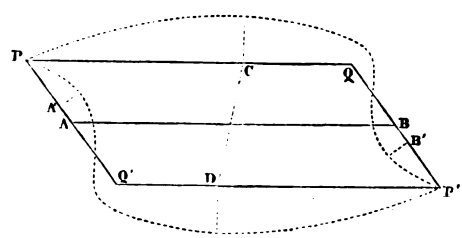


Fig. 295.

Ces courants, dus à l'obliquité des sections, ont été appelés courants d'*inclinaison;* ils sont quelquefois très-intenses et arrivent bientôt à voiler le phénomène principal. Ainsi, avec le muscle gastrocnémien d'une grenouille, M. Du Bois-Reymond a obtenu un courant d'inclinaison dont la force électromotrice équivalait à 0,114 d'un couple Daniell, tandis que la force élec-

tromotrice développée entre les sections longitudinale et transversale sur un muscle normal est de 0,04 à 0,08 d'un Daniell, et que celle du nerf sciatique n'atteint que 0,028.

Il suffit d'ailleurs de tailler dans un muscle quelconque une petite lame en forme de losange et de toucher deux angles voisins par des électrodes non polarisables, pour obtenir un courant qui va de l'angle obtus à l'angle aigu. Ce qui prouve bien que l'effet est dû à la forme même du losange, c'est qu'on renverse le sens du courant en étirant le muscle, de façon que les angles primitivement obtus deviennent aigus et inversement.

Quand on étudie l'électricité fournie par un membre entier, en établissant une communication entre les muscles et les nerfs, les effets que l'on obtient sont la résultante des actions de toutes les fibres élémentaires. Comme les muscles forment la masse la plus volumineuse des tissus et que leurs courants, à dimensions égales, sont aussi plus forts que ceux des nerfs, on peut considérer les muscles comme intervenant pour la plus grande part dans la production d'un courant général.

1036. **Influence des contractions.** — Les propriétés électriques d'un muscle sont en relation directe avec son état de contraction ou de relâchement. Lorsqu'un muscle cylindrique dont on a ménagé le nerf est mis en communication avec un galvanomètre par l'une des extrémités de l'axe et un point de l'équateur, l'aiguille éprouve une certaine déviation ; si l'on excite alors le nerf, soit par la chaleur, soit par une action mécanique ou un courant d'induction, de manière à produire une contraction tétanique, aussitôt l'aiguille du galvanomètre se rapproche du zéro ; l'aiguille revient à sa position primitive quand le muscle rentre au repos, et les mêmes modifications se manifestent pour une nouvelle contraction. Il y a donc, au moment de la contraction, une *variation négative* du courant musculaire, et les différences de potentiel de la surface tendent à s'annuler. Les variations de température qu'éprouve alors le muscle interviennent peut-être en partie dans cette modification électrique.

Un autre moyen de mettre le même phénomène en évidence est de réunir par un galvanomètre les deux membres inférieurs d'une grenouille reliés encore par leurs nerfs lombaires ; l'aiguille alors n'est pas déviée, mais il suffit de provoquer la con-

traction d'un des membres pour obtenir un courant qui va, par l'extérieur, du membre contracté à celui qui ne l'est pas.

Dans les expériences de cette nature on opère presque toujours sur des organes enlevés à des animaux sacrifiés ; quand on emploie des animaux vivants, il est nécessaire de pratiquer des blessures pour détacher l'épiderme qui est mauvais conducteur et pénétrer jusqu'à la surface véritable des muscles ou des nerfs. On peut donc attribuer la production d'électricité à des effets chimiques ou thermoélectriques, parce que les organes exposés à l'air subissent une altération rapide et laissent exsuder des liquides différents, et que l'inflammation qui se manifeste au voisinage d'une plaie ou d'une blessure sur un animal vivant y provoque une élévation de température très-sensible. Toutefois les résultats ne sont pas modifiés quand on fait les expériences dans un gaz quelconque privé d'oxygène et quand on pénètre dans les tissus d'un animal vivant de manière à n'y pas produire de blessures appréciables.

1037. M. Du Bois-Reymond a manifesté par les contractions musculaires des courants qui paraissent présenter quelque analogie avec le phénomène de la variation négative. On fait communiquer avec un galvanomètre deux vases renfermant de l'eau salée ou tout autre liquide conducteur. Un observateur tient une barre de bois par les deux mains en plongeant les index séparément dans les deux liquides. L'aiguille étant en repos, on contracte une des mains en serrant la barre : aussitôt l'aiguille est déviée, indiquant un courant qui va, par le corps de l'observateur, du bras contracté à celui qui ne l'est pas. Ces courants disparaissent peu de temps après que la contraction a cessé.

M. Buff a réalisé ainsi une véritable pile en formant une chaîne de 16 personnes qui se tenaient par les mains. Toutes les personnes de la chaîne contractant le même bras, il se produisait un courant d'un certain sens, et le courant changeait de sens par la contraction de l'autre bras.

On répète cette expérience d'une manière plus simple en tenant dans les mains deux poignées de cuivre, comme celles qui servent pour les secousses physiologiques, reliées à un galvanomètre à fil très-long. Il se manifeste un courant dans un sens ou dans le sens opposé, suivant que l'on contracte l'une ou l'autre

fruits deux aiguilles de platine, l'une du côté de la queue, et l'autre du côté de l'œil. Suivant les espèces de fruits, le courant allait tantôt dans un sens et tantôt en sens contraire.

M. Becquerel (1) touchait de même, par des aiguilles de platine, deux points de la surface obtenue en coupant une tige par une section transversale, et il a constaté que la moelle était toujours positive par rapport aux portions ligneuses plus éloignées, de sorte que le potentiel serait maximum dans l'axe de la plante et irait en diminuant d'une manière continue jusqu'à la couche corticale ; dans cette couche, au contraire, les effets électriques seraient inverses et le potentiel irait en augmentant avec la distance à l'axe. M. Becquerel a fait aussi beaucoup d'expériences avec des feuilles, des tubercules, des racines et a toujours obtenu des courants très-marqués.

L'emploi des aiguilles de platine est sujet à beaucoup d'erreurs, parce qu'il est très-difficile d'éviter la polarisation des électrodes, et les expériences réalisées sur des portions détachées des végétaux peuvent être en outre influencées soit par les altérations que les tissus éprouvent au contact de l'air, soit par la forme même des fragments, comme pour les cylindres musculaires à sections obliques. M. Buff (2) a repris cette étude en évitant, autant que possible, de mutiler les plantes et en prenant pour électrodes des colonnes d'eau en contact avec du mercure, de manière à éliminer toute force électromotrice étrangère. Pour comparer l'état électrique des feuilles avec celui des racines, la plante était enlevée de terre, les racines bien lavées dans un courant d'eau, puis on plongeait les racines et les feuilles séparément dans les deux vases servant d'électrodes ; il se produisit toujours un courant allant des feuilles aux racines par le galvanomètre. L'expérience donnait les mêmes résultats quand on comparait une branche séparée du végétal avec les feuilles, les fleurs et les fruits. On peut donc regarder comme établi que les racines et toutes les parties internes des plantes, qui sont remplies des sucs de la végétation, sont négatives par rapport à la surface plus ou moins humide des feuilles, des fleurs, des fruits et des jeunes rameaux.

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXXI, p. 40.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XLI, p. 198.

1039. **Électricité dans les végétaux.** — Il est à présumer, d'après cela, que la végétation des plantes et les différents organes qui constituent les végétaux doivent aussi être des sources d'électricité. Pouillet a placé de la terre végétale dans des capsules de verre vernies et parfaitement isolées, qu'il mettait en communication avec un électroscope condensateur. Il a semé dans la terre humide des graines de plantes à végétation rapide, comme le blé, le cresson, la giroflée et la luzerne. Tant que le germe des graines n'était pas sorti de terre, le condensateur ne donnait aucune trace d'électricité; mais, dès que la végétation à l'air eut commencé, l'électroscope essayé à différentes heures de la journée ou de la nuit, et ramené à l'état neutre après chaque observation, se montra toujours chargé d'électricité négative. Ces expériences ne réussirent que dans l'intérieur d'une chambre où l'air était convenablement desséché, sans doute parce que l'humidité condensée sur les vases établissait une communication suffisante avec le sol pour faire disparaître l'électricité à mesure de sa production. On pouvait donc en conclure que les gaz qui s'échappent des plantes, pendant l'acte de la respiration, sont électrisés positivement par rapport à la surface du sol, et deviennent ainsi l'une des sources importantes de l'électricité atmosphérique.

Toutefois ces résultats ont été mis en doute par M. Riess (1). Ce physicien remplit de terre végétale, maintenue constamment humide, un vase de laiton ou de porcelaine en communication avec un électroscope condensateur, et il y fit germer du cresson. Un deuxième vase tout semblable, et contenant la même terre non ensemencée, fut relié avec un autre électroscope pour servir de témoin. En observant l'appareil tous les jours il trouva souvent des traces d'électricité, mais de signes variables, et les deux vases donnèrent constamment les mêmes résultats, ce qui semble indiquer que l'origine de l'électricité est tout à fait accidentelle et ne saurait être attribuée à la végétation.

1040. Au contraire, l'existence de forces électromotrices dans les organes des végétaux ne paraît pas douteuse. M. Donné, par exemple, obtenait un courant électrique en plongeant dans des

(1) *Pogg. Annal.*, t. XIX, p. 228.

fruits deux aiguilles de platine, l'une du côté de la queue, et l'autre du côté de l'œil. Suivant les espèces de fruits, le courant allait tantôt dans un sens et tantôt en sens contraire.

M. Becquerel (1) touchait de même, par des aiguilles de platine, deux points de la surface obtenue en coupant une tige par une section transversale, et il a constaté que la moelle était toujours positive par rapport aux portions ligneuses plus éloignées, de sorte que le potentiel serait maximum dans l'axe de la plante et irait en diminuant d'une manière continue jusqu'à la couche corticale ; dans cette couche, au contraire, les effets électriques seraient inverses et le potentiel irait en augmentant avec la distance à l'axe. M. Becquerel a fait aussi beaucoup d'expériences avec des feuilles, des tubercules, des racines et a toujours obtenu des courants très-marqués.

L'emploi des aiguilles de platine est sujet à beaucoup d'erreurs, parce qu'il est très-difficile d'éviter la polarisation des électrodes, et les expériences réalisées sur des portions détachées des végétaux peuvent être en outre influencées soit par les altérations que les tissus éprouvent au contact de l'air, soit par la forme même des fragments, comme pour les cylindres musculaires à sections obliques. M. Buff (2) a repris cette étude en évitant, autant que possible, de mutiler les plantes et en prenant pour électrodes des colonnes d'eau en contact avec du mercure, de manière à éliminer toute force électromotrice étrangère. Pour comparer l'état électrique des feuilles avec celui des racines, la plante était enlevée de terre, les racines bien lavées dans un courant d'eau, puis on plongeait les racines et les feuilles séparément dans les deux vases servant d'électrodes ; il se produisit toujours un courant allant des feuilles aux racines par le galvanomètre. L'expérience donnait les mêmes résultats quand on comparait une branche séparée du végétal avec les feuilles, les fleurs et les fruits. On peut donc regarder comme établi que les racines et toutes les parties internes des plantes, qui sont remplies des sucs de la végétation, sont négatives par rapport à la surface plus ou moins humide des feuilles, des fleurs, des fruits et des jeunes rameaux.

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXXI, p. 40.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XLI, p. 198.

PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-CAPILLAIRES.

1041. **Expériences de M. Becquerel.** — M. Becquerel (1) considère comme due aux phénomènes de capillarité l'électricité qui se manifeste dans l'expérience suivante. Dans une cuiller de platine, qui communique avec l'un des fils d'un galvanomètre, il verse de l'acide chlorhydrique étendu, puis il plonge dans le liquide une éponge de platine tenue par une pince du même métal et communiquant avec l'autre fil. Au même instant, il se produit un courant qui va de la cuiller à l'éponge par le galvomètre; mais, à mesure que les interstices de l'éponge se remplissent de liquide, le courant s'affaiblit peu à peu et finit par s'annuler. Pour recommencer ensuite l'expérience, il faut laver l'éponge dans l'eau à plusieurs reprises, puis la chauffer au dard d'un chalumeau. Les résultats sont les mêmes avec l'acide nitrique, quoique moins marqués. Le charbon de bois plongé dans l'acide nitrique ou dans l'acide sulfurique donne aussi des courants dont la durée est même plus grande qu'avec l'éponge de platine, mais cette fois le courant va du charbon au galvanomètre. Ces phénomènes, dont le sens est quelquefois variable d'une expérience à l'autre, peuvent être attribués à l'influence des gaz que les corps poreux, et la mousse de platine en particulier, absorbent en grande abondance, ou même en partie à des changements de température. Il ne paraît pas démontré que la capillarité y intervienne directement.

1042. Depuis quelques années, M. Becquerel (2) a étudié d'autres phénomènes très-curieux, dans lesquels il attribue un rôle important aux actions capillaires. Lorsque deux liquides sont séparés par un espace très-resserré, comme une fente étroite dans un tube fêlé, ou l'intervalle de deux lames de verre appliquées l'une contre l'autre, ou les interstices d'une membrane poreuse, comme le papier parcheminé et le collodion, le contact des liquides s'établit par des surfaces très-restreintes et il peut en résulter des effets électriques particuliers, tout différents de ceux qu'on obtiendrait si les liquides étaient en contact par des sur-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXIV, p. 341.
(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXIV et suivants, passim.

faces plus étendues. M. Becquerel a reproduit ainsi un certain nombre de composés cristallisés analogues à ceux que l'on trouve dans la nature : des sulfures métalliques, l'alumine à 3 équivalents d'eau, des oxydes métalliques, le silicate de cuivre, l'aluminate de magnésie, le fluorure de calcium, etc.

Le procédé d'expérience employé par M. Becquerel paraît être un moyen de constituer des couples qui présentent une résistance intérieure considérable et dans lesquels les échanges entre les différents liquides ne s'effectuent qu'avec une extrême lenteur. Les deux liquides qui sont séparés par un espace capillaire franchissent l'un ou l'autre cet espace, ou le traversent tous deux en proportions différentes. Dès que le contact a lieu, il s'effectue entre eux des réactions chimiques qui donnent des corps nouveaux. Si l'un des produits se sépare à l'état solide, il reste un liquide intermédiaire, différent des deux premiers, qui modifie la force électromotrice ; les échanges qui ont lieu par diffusion s'opèrent très-lentement et l'on se trouve ainsi dans des conditions très-favorables à la formation de corps cristallisés. M. Becquerel pense que des phénomènes de même nature sont réalisés dans les animaux et les végétaux, où les liquides de l'organisme circulent ainsi par des tubes très-étroits, analogues aux espaces capillaires d'un tube fêlé ou de deux lames de verre rapprochées jusqu'au contact.

1043. **Expériences de M. Lippmann.** — Les phénomènes de capillarité donnent lieu cependant à de véritables forces électromotrices, en relation intime avec la polarisation des électrodes. Supposons qu'une colonne de mercure, placée dans un tube capillaire, soit en contact avec de l'eau acidulée. Si l'on met le mercure et l'eau séparément en communication avec le pôle négatif et le pôle positif d'une pile dont la force électromotrice est insuffisante pour décomposer l'eau d'une manière continue, le mercure se polarise et se recouvre d'une petite quantité d'hydrogène condensé. La surface de séparation des deux liquides est alors modifiée, et l'on conçoit que la constante capillaire, ou la tension superficielle, n'ait plus la même valeur que précédemment. M. Lippmann [1] a constaté, en effet, que les phénomènes de ca-

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 5e série, t. V, p. 494.

pillarité sont alors modifiés; il a déterminé par plusieurs méthodes la relation qui existe entre les changements de dépression capillaire et les valeurs de la différence de potentiel qu'on établit entre les deux liquides.

Un tube capillaire A (fig. 296), par exemple, parfaitement cylindrique, communique d'une part avec un vase plus large C renfermant du mercure, et d'autre part, à l'aide d'un siphon, avec un verre D contenant de l'eau acidulée par un dixième d'acide sulfurique, au fond de laquelle se trouve une couche B de mercure. Les deux masses de mercure peuvent être mises en communication avec l'extérieur par des fils de platine α et β. Si les fils α et β communiquent entre eux, le potentiel est le même dans les deux masses de mercure, l'eau acidulée est à un potentiel différent déterminé par le contact des deux liquides, et le niveau du mercure s'arrête dans le tube capillaire en un point M, où il revient exactement quand on fait osciller la colonne liquide. La position d'équilibre est au contraire très-variable, comme on le verra plus loin, si les deux masses de mercure ne sont pas en communication; c'est là la cause principale des perturbations, qui ont été observées dans la mesure, des effets de capillarité, surtout quand on opère avec le mercure.

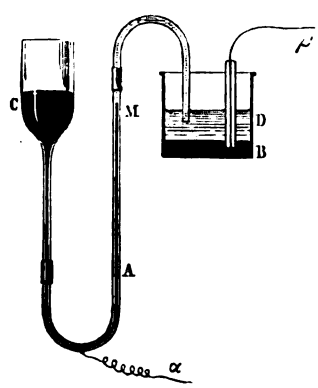


Fig. 296.

La constance de la dépression capillaire dans ces conditions normales étant bien démontrée, on établit par une pile auxiliaire une différence de potentiel déterminée entre les deux fils α et β, en ayant soin que le mercure en M soit négatif, et l'on observe au cathétomètre le déplacement de la colonne de mercure. La nouvelle position d'équilibre est encore absolument constante, lorsque la différence du potentiel ne change pas; on peut donc, au moyen d'un électromètre, déterminer la relation empirique qui existe entre ces deux quantités (1).

(1) La polarisation du mercure par l'oxygène devrait donner des résultats de même ordre, mais l'expérience n'est pas réalisable : la surface du mercure se ternit par une

1044. Cette méthode présente quelques imperfections, parce qu'il est difficile d'obtenir un tube capillaire dont le diamètre soit parfaitement constant, de sorte que les différences de niveau ne représentent pas exactement les changements de capillarité. Il vaut mieux ramener le liquide au même point dans toutes les expériences, à l'aide d'une pression auxiliaire que l'on détermine.

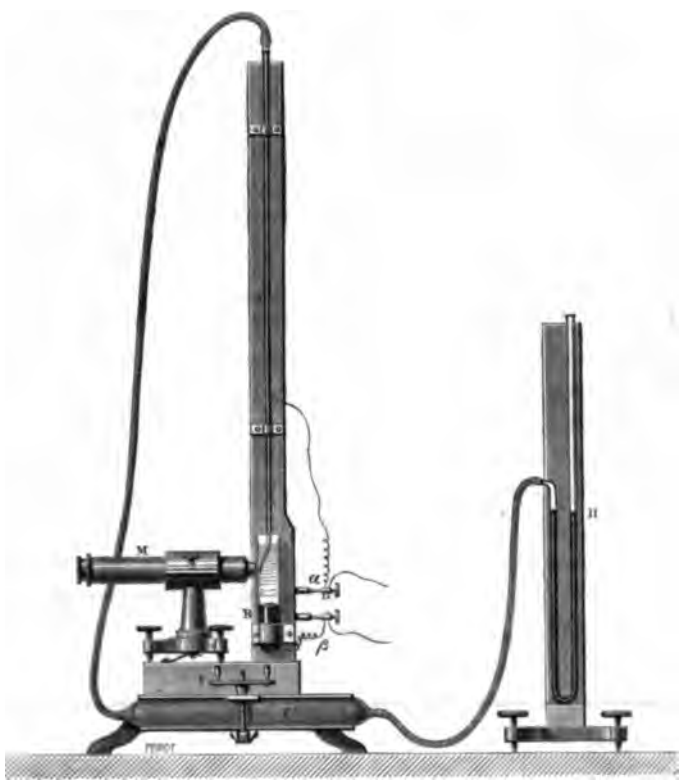


Fig. 297.

Pour cela, on effile à la lampe la partie inférieure d'un tube de verre A (fig. 297) que l'on remplit de mercure ; on fait plonger la pointe dans un autre tube B contenant de l'eau acidulée et renfermant à la partie inférieure une couche de mercure. Quand on fait communiquer les deux masses de mercure par des fils de

couche noire d'oxyde. le tube de verre s'encrasse et les positions d'équilibre deviennent tout à fait irrégulières.

platine α et β, la surface de séparation des liquides dans la portion effilée s'arrête en un point où le diamètre est tel que les actions capillaires, déterminées par la tension superficielle normale des deux liquides, suffisent à équilibrer la pression de la colonne mercurielle; on observe cette position avec un microscope à réticule M. Si l'on établit alors une différence de potentiel entre les fils α et β, la tension superficielle est augmentée, le mercure remonte, et il est nécessaire d'augmenter la pression de la colonne pour ramener le ménisque au même point. Un moyen très-simple est de faire communiquer l'extrémité supérieure du tube AB avec un manomètre H, par l'intermédiaire d'un tube de caoutchouc T à parois épaisses, que l'on comprime plus ou moins à l'aide d'un écrou E. On mesure alors la différence de pression accusée par le manomètre, et la différence de potentiel ou la force électromotrice correspondante.

1045. M. Lippmann a constaté ainsi que la tension superficielle augmente d'abord à peu près proportionnellement à la force électromotrice, jusqu'à un maximum qui a lieu pour une différence de potentiel égale à 0,9 de celle d'un couple Daniell; la tension superficielle atteint alors 1,47 fois sa valeur normale. A partir de ce point, la tension superficielle diminue jusqu'à ce que la force électromotrice devienne égale à celle de deux couples Daniell. Voici les résultats numériques, en prenant pour unité la force électromotrice d'un Daniell, la pression primitive étant de 750^{mm} pour la tension normale.

FORCE ÉLECTROMOTRICE	ACCROISSEMENT DE PRESSION	FORCE ÉLECTROMOTRICE	ACCROISSEMENT DE PRESSION
0,016	15^{mm}	0,500	288^{mm}
0,024	21,5	0,588	314
0,040	40	0,833	356,5
0,109	89	0,900	358,5
0,140	111	0,909	358,5
0,170	131	1,000	353
0,197	148	1,261	301
0,269	188,5	1,444	259
0,364	235	1,833	110
0,450	270,5	2,000	94

On voit immédiatement que, cette table de graduation une fois établie, l'appareil peut servir d'électromètre. La sensibilité est d'autant plus grande que le tube capillaire est plus mince, puisque la différence de potentiel que l'on introduit modifie simplement la constante capillaire, et que les changements de pression seront, toutes choses égales, proportionnels à la pression primitive. Cet électromètre ne peut servir directement qu'à l'évaluation de forces électromotrices inférieures aux 0,6 d'un Daniell, mais il permet d'apprécier facilement la millième partie de cette quantité ; comme sa capacité électrique est très-faible, il peut mettre en évidence des changements rapides de potentiel, auxquels les électromètres ordinaires ou les galvanomètres les plus délicats seraient insensibles.

Il est facile de construire aussi des électromètres capillaires de dimensions beaucoup plus petites, en observant les déplacements de la surface du mercure dans un tube capillaire, mais alors chaque instrument doit avoir sa table, si le tube n'est pas parfaitement cylindrique. Les indications de ces appareils paraissent indépendantes des variations de température, du moins entre 0° et 50°.

1046. D'après ce qui précède, la constante capillaire, ou la tension superficielle sur la surface de séparation de l'eau et du mercure, est une fonction de la différence de potentiel des deux liquides. Cette tension superficielle et l'excès du potentiel de l'eau sur le potentiel du mercure sont deux quantités qui augmentent et diminuent en même temps.

Réciproquement, si l'on déforme mécaniquement la masse de mercure, de manière à augmenter sa surface, la différence des potentiels augmente, ainsi que la tension superficielle ; si l'on diminue la surface, la différence des potentiels et la tension superficielle diminuent. Il résulte de là que, lorsqu'on déforme une surface liquide par des moyens mécaniques, la différence des potentiels varie dans un sens tel que la tension superficielle correspondante s'oppose à la continuation du mouvement.

M. Lippmann démontre cette propriété par des expériences très-simples. Deux verres, contenant tous les deux du mercure recouvert par de l'eau acidulée, sont placés l'un à côté de l'autre et mis en communication au moyen d'une mèche de coton ou

d'une bande de papier à filtrer; les deux masses de mercure communiquent séparément avec des fils de platine qui ne touchent pas l'eau acidulée. On met ces fils en relation avec un galvanomètre, puis on incline l'un des verres : aussitôt l'aiguille est déviée, indiquant un courant qui va, à travers le liquide, du verre penché au verre resté droit. On reconnaîtrait de même, au moyen d'un électromètre, que le potentiel a diminué sur le mercure du verre penché. La différence se dissipe peu à peu et, au bout de quelque temps, les deux masses de mercure reprennent le même potentiel.

On peut ainsi obtenir par des moyens mécaniques un courant électrique continu. Un entonnoir effilé A (fig. 298) contient du mercure qui s'écoule par sa pointe au sein d'une masse d'eau acidulée renfermée dans un verre au fond duquel se trouve une couche de mercure B. Au moyen de deux fils α et β on met les deux masses de mercure en communication avec un galvanomètre et l'on obtient un courant permanent qui va de l'entonnoir au verre à travers le liquide. Le galvanomètre n'indique alors que la résultante générale du phénomène. Si l'on met, au contraire, les fils α et β en relation avec un électromètre capillaire, on observe que le potentiel du mercure A éprouve des variations périodiques pendant la formation de chacune des gouttes. Ces changements donnent lieu encore à une expérience curieuse. Si, les fils α et β restant isolés, la quantité de mercure est assez faible pour que l'écoulement s'arrête à un certain moment, on peut constater que le mercure de l'entonnoir est à un potentiel plus faible que celui du verre. En joignant les fils α et β, il se produit un courant continu et l'écoulement recommence, pour cesser encore dès que l'on interrompt le circuit.

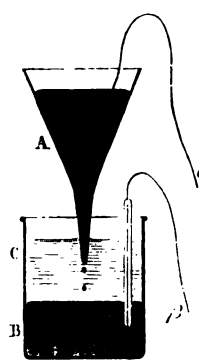


Fig. 298.

1047. Le changement des propriétés électriques d'une surface par les actions mécaniques est d'ailleurs une conséquence de la relation qui existe entre la tension superficielle et la différence des potentiels.

Considérons une masse de mercure en contact avec de l'eau

acidulée. Appelons S la surface de contact, A la tension superficielle, et x l'excès du potentiel de l'eau sur celui du mercure. Lorsque la surface éprouve une déformation infiniment petite, de manière à devenir égale à $S + dS$, le travail accompli par la tension superficielle est égal à $-A dS$.

Supposons qu'une quantité d'électricité dm, fournie par une source étrangère, traverse la surface en allant de l'eau au mercure, il en résultera un changement dx de la différence des potentiels en même temps qu'une modification dS de la surface. Les quantités x et S étant des variables indépendantes, on peut écrire

$$dm = X dS + YS dx.$$

Le coefficient X peut être appelé la capacité électrique de l'unité de surface à différence de potentiel constante, et le coefficient Y la capacité électrique de l'unité de surface d'une électrode de métal, la surface restant constante. Le travail produit par la masse électrique dm, qui éprouve une chute de potentiel égale à x, a pour valeur $x dm$. Ce travail introduit dans l'appareil est égal au travail nécessaire pour déformer la surface, c'est-à-dire à l'accroissement d'énergie de la surface considérée comme une membrane élastique, plus au travail extérieur accompli $-A dS$. Si l'on répète la même opération plusieurs fois en sens contraires, de manière que l'état final soit le même que l'état initial, la variation d'énergie sera nulle et le travail électrique total $\int x dm$ sera égal au travail extérieur $\int -A dS$ accompli par l'appareil. On aura donc

$$\int x dm = \int -A dS,$$

ou bien

$$\int (x dm + A dS) = 0.$$

Si l'on remplace dm par sa valeur, l'expression comprise entre parenthèses devient

$$x X dS + x Y S dx + A dS;$$

cette expression doit être une différentielle exacte d'une fonction

des deux variables indépendantes x et S. Il en résulte la condition

$$\frac{d(A + xX)}{dx} = xY. \tag{1}$$

Si les forces électromotrices mises en jeu restent toujours insuffisantes pour opérer une décomposition de l'eau appréciable, la quantité totale d'électricité, pour un cycle fermé, doit être nulle, et l'on a alors $\int dm = 0$. Il faut donc que dm soit aussi une différentielle exacte, ce qui donne la condition

$$\frac{dX}{dx} = Y. \tag{2}$$

On déduit des équations (1) et (2)

$$X = -\frac{dA}{dx} \tag{3}$$

$$Y = -\frac{d^2A}{dx^2}. \tag{4}$$

$$dm = -\frac{dA}{dx}\,dS - S\frac{d^2A}{dx^2}\,dx = -d\left(S\frac{dA}{dx}\right). \tag{5}$$

On connaît ainsi l'expression des capacités électriques en fonction de la tension superficielle. Il résulte de là que, si la tension superficielle est une fonction de la différence des potentiels x, comme l'indiquent les premières expériences, la dérivée de cette fonction n'est pas nulle; la capacité électrique X n'est donc pas nulle et, en changeant la forme de la surface, on doit modifier la différence des potentiels. La réciproque est vraie.

Il faut remarquer toutefois que, dans cette démonstration relative au cycle fermé, on n'a fait intervenir que les travaux extérieurs et les modifications d'énergie potentielle de la surface. On a donc supposé qu'il n'y avait pas de dégagement de chaleur, ou du moins que, par suite de la rapidité des alternatives, la surface n'éprouvait ni perte ni gain de chaleur comme résultat final. En outre, en écrivant que la somme totale des quantités d'électricité qui traversent la surface est nulle, on admet implicitement que les liquides décomposables par l'électricité, comme l'eau, n'ont aucune conductibilité propre indépendante

de l'électrolyse, de sorte que toute quantité d'électricité qui traverse la surface décompose une quantité d'eau qui lui est proportionnelle. Cette proposition est au moins très-approchée, mais plusieurs physiciens ne la considèrent pas comme rigoureusement démontrée. Enfin, il peut arriver qu'une partie des gaz qui produisent la polarisation des électrodes se dissipe par diffusion dans le liquide, et s'échappe ensuite par sa surface, sans donner lieu à un travail électrique correspondant.

1048. M. Lippmann a construit, d'après ces principes, un moteur électrique dans lequel il a réalisé les conditions du cycle fermé. L'appareil est formé de deux paquets de tubes capillaires plongeant séparément dans des vases qui contiennent une couche de mercure recouverte d'eau acidulée. Ces paquets de tubes sont portés par les extrémités d'un levier qui peut tourner autour d'un axe horizontal. Quand on met les couches de mercure en communication avec les pôles d'un couple Daniell, la tension superficielle augmente dans le mercure négatif; le paquet de tubes correspondant est soulevé d'une certaine quantité. L'effet inverse a lieu à l'autre pôle, de sorte que le levier éprouve un petit déplacement. Si l'on utilise les oscillations du levier lui-même pour faire manœuvrer un commutateur, on réalise un appareil dont le mouvement s'entretient indéfiniment et qui peut être employé comme moteur électrique.

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

1049. **La foudre est un phénomène électrique.** — L'idée de comparer les effets de l'électricité avec ceux de la foudre est très-ancienne, et l'on trouve l'indication de cette analogie dans les travaux de la plupart des physiciens qui ont étudié les étincelles électriques. Les points de ressemblance entre les deux genres de phénomènes devenaient de plus en plus nombreux à mesure que la science de l'électricité se développait; mais ces rapprochements, plus ou moins heureux, étaient restés à l'état de conjectures jusqu'au moment où Franklin eut l'idée d'en donner une démonstration expérimentale, en soutirant l'électricité d'un nuage orageux.

Le 7 novembre 1749, Franklin (1) résumait dans les termes suivants, sur son cahier de laboratoire, les propriétés communes au fluide électrique et à la foudre : « 1° production de lumière; — 2° couleur de cette lumière; — 3° direction en zigzag; — 4° rapidité du mouvement; — 5° transmission par les métaux; — 6° bruit ou craquement dans l'explosion; — 7° propagation dans l'eau ou la glace; — 8° rupture des corps traversés; — 9° mort des animaux; — 10° fusion des métaux; — 11° inflammation des matières combustibles; — 12° odeur sulfureuse; » et Franklin ajoute : « Le fluide électrique est attiré par les pointes. Nous ne savons pas si la foudre jouit de cette propriété : mais, puisque les deux phénomènes présentent tant de particularités communes, n'est-il pas probable qu'ils partagent encore celle-ci? Il y a lieu d'en faire l'expérience. »

Franklin ne se borne pas à ces indications. Ayant reconnu qu'un tube électrisé de 10 pieds de long se décharge sur une pointe à la distance de 2 ou 3 pouces, il en conclut qu'un nuage électrisé doit se décharger sur la terre à une distance proportionnellement beaucoup plus grande. Pour vérifier si les nuages qui contiennent la foudre sont électrisés (2), il propose donc de construire sur une tour élevée une petite guérite, assez grande pour contenir un homme, et munie d'une tige de métal isolée de 20 à 30 pieds de hauteur terminée en pointe. Un observateur placé sur un tabouret isolant et communiquant avec la tige, doit être fortement électrisé au moment où de pareils nuages passeront à une petite distance, et pourra tirer des étincelles des corps voisins. Si l'expérience paraît trop dangereuse sous cette forme, l'observateur pourra se tenir en communication avec le sol, et approcher de temps en temps du bas de la tige isolée un autre fil de métal relié aussi avec le sol et tenu par un manche isolant. Avant même que l'expérience ait pu être réalisée, Franklin indique comment cette propriété des pointes peut être utilisée dans un but humanitaire, pour préserver de la foudre les maisons, les églises, les vaisseaux et tous les édifices élevés. Une pointe de métal à l'extrémité d'une longue tige attirerait probablement l'électricité d'un nuage d'une

(1) Lettre au Dr Linning, 18 mars 1755.
(2) Lettre à Collinson, 29 juillet 1750.

manière silencieuse, avant qu'il soit assez rapproché pour se décharger brusquement.

1050. — Les projets de Franklin furent mis à exécution pour la première fois en France par Dalibard (1). Au milieu d'une plaine élevée, située à Marly-la-Ville, Dalibard fit dresser une tige de fer, d'environ 1 pouce de diamètre et de 40 pieds de longueur, terminée par une pointe aiguë d'acier trempé. Cette tige était soutenue par des cordons de soie, attachés à trois perches de hauteur un peu moindre, et communiquait à la partie inférieure avec un tabouret isolant. Le 10 mai 1752, pendant un temps d'orage, on put tirer des étincelles de la partie inférieure de la tige à l'aide d'un fil de métal tenu par un manche de verre. Cette expérience célèbre confirma d'une manière remarquable toutes les prévisions de Franklin.

L'expérience fut aussi réalisée par Franklin sous une autre forme (2). Impatient d'attendre l'achèvement d'une tour qu'il s'était proposé d'utiliser, il construisit un cerf-volant avec un mouchoir de soie, afin qu'il pût mieux résister à la pluie. Le cerf-volant était tenu par une corde de chanvre munie d'un bout de soie à la partie inférieure. Un nuage orageux vint à passer sans qu'on pût manifester la moindre trace d'électricité. Franklin désespérait du succès de son expérience quand il vit tout à coup les filaments de la corde se dresser dans toute la longueur; en présentant une clef à la partie inférieure de la corde, il en tira une puissante étincelle. Les effets furent surtout marqués quand une petite pluie vint mouiller la corde de manière à la rendre conductrice; on pouvait en tirer de longues étincelles, charger une bouteille de Leyde, enflammer l'alcool, répéter en un mot toutes les expériences d'électricité ordinaire.

L'année suivante, de Romas (3) fit l'expérience du cerf-volant en France, sans savoir qu'elle avait déjà été exécutée par Franklin. De Romas eut l'idée heureuse de rendre la corde plus conductrice en l'entrelaçant d'un fil métallique. Cette corde était enroulée sur un treuil isolé qui permettait de la développer plus

(1) Franklin. *Expériences sur l'électricité*, traduction française par Dalibard, t. II, p. 67.

(2) Lettre à Collinson, 10 octobre 1752.

(3) *Mémoires des savants étrangers*, t. II, p. 393, et t. IV, p. 511.

ou moins, sans qu'on fût obligé d'y toucher. Il obtint tous les effets électriques qu'avait déjà observés Franklin; pendant un orage assez faible du 16 août 1757, il tira de la partie inférieure de la corde des étincelles qui avaient jusqu'à 4 mètres de longueur et près de 3 centimètres d'épaisseur, et produisaient plus de bruit que des coups de pistolet. Il était démontré par là que les expériences pouvaient être très-dangereuses, malgré toutes les précautions dont on pût s'entourer; la mort de Richmann, frappé d'un coup de foudre à Saint-Pétersbourg dans le voisinage d'un appareil qui lui servait à étudier l'électricité des orages, fit bientôt renoncer les physiciens à ce genre d'observations.

1051. — Dans le mois de septembre 1752, Franklin (1) fit ériger sur sa maison une tige de métal isolée qu'il termina à la partie inférieure par un carillon électrique, pour être prévenu du moment où l'appareil serait électrisé. Les timbres sonnaient quelquefois sans qu'il y eût apparence d'éclairs ou de tonnerre, mais seulement au passage de nuages noirs au-dessus de la tige; parfois la sonnerie s'arrêtait brusquement à la suite d'un éclair; d'autres fois elle se mettait seulement en marche après l'apparition d'un éclair; tantôt les étincelles se succédaient à de longs intervalles, tantôt elles étaient très-rapides et formaient une traînée continue entre les timbres. Pendant l'hiver suivant, il chercha quelle était la nature de l'électricité par la charge que la tige donnait à une bouteille de Leyde; il conclut d'un grand nombre d'observations que les nuages orageux sont électrisés tantôt dans un sens, tantôt en sens contraire, mais le plus souvent d'électricité négative.

1052. L'électrisation des nuages et l'existence d'électricités de signes contraires étant démontrées, la foudre devient alors un phénomène entièrement comparable aux décharges des batteries. Quand une décharge électrique a lieu, soit entre deux nuages différents, soit entre un nuage et un objet quelconque communiquant avec la surface du sol, auquel cas on dit que la foudre est tombée, les effets produits sont, dans des proportions plus grandes, identiques à ceux qu'on obtient par l'électricité des

(1) Lettre à Collinson, septembre 1753.

machines : le bruit de la décharge ou le *tonnerre*, la forme en zigzag des *éclairs*, leur couleur, l'odeur sulfureuse qui rappelle l'ozone, les décompositions chimiques, la fusion des métaux, la rupture des corps mauvais conducteurs, l'inflammation des substances combustibles, l'aimantation et la désaimantation de l'acier, l'illumination des pointes soumises à l'influence de nuages électrisés, les actions physiologiques produites soit par des étincelles directes, soit par suite du choc en retour, etc. Nous ne pouvons pas entrer ici dans le détail de tous ces phénomènes. Nous renverrons le lecteur aux ouvrages spéciaux de météorologie, à la remarquable notice d'Arago sur le tonnerre (1), aux atlas sur la marche des orages publiés par l'Observatoire de Paris, etc. Nous insisterons seulement au point de vue physique sur quelques-unes des circonstances.

1053. **Du tonnerre.** — Si les nuages étaient des corps conducteurs de l'électricité à la manière des métaux, lorsque deux d'entre eux se rapprocheraient à une certaine distance, il s'y produirait une étincelle électrique, ou un éclair. Si alors ils n'étaient soumis qu'aux seules actions électriques, ils finiraient par se réunir, soit en une masse unique sur laquelle serait accumulée toute l'électricité primitive, soit en masses différentes qui, étant électrisées de la même manière, se repousseraient réciproquement et se sépareraient de plus en plus. Dans ces conditions, l'état final devrait être précédé d'un certain nombre de décharges partielles constituant les éclairs et le tonnerre, et se conserverait jusqu'à ce que chacune des masses principales vînt à se résoudre en une pluie qui entraînerait l'électricité vers la terre, ou à passer à une distance assez faible d'un corps conducteur communiquant avec le sol, pour y provoquer une décharge brusque. En réalité le phénomène est beaucoup moins simple. Indépendamment des mouvements que les nuages doivent à l'action de causes étrangères à l'électricité, il faut remarquer que la substance qui constitue les nuages n'est qu'un corps médiocrement conducteur, et qu'au lieu de former une masse continue, elle est agglomérée d'une manière très-irrégulière en masses isolées les unes des autres par l'air ambiant, de sorte

(1) *Annuaire du Bureau des longitudes*, pour l'année 1838.

qu'il peut s'écouler un temps très-long et se produire un grand nombre de décharges partielles, avant que l'état d'équilibre final soit atteint.

« Un nuage est formé, dit Peltier (1), d'une foule d'individualités plus ou moins isolées, plus ou moins distinctes et indépendantes : c'est ce qu'on appelle des flocons, des mamelons, des nuelles, etc. Chacune de ces individualités a sa sphère électrique ; puis le nuage tout entier a la sienne. Toutes ces sphères électriques sont en équilibre de tension entre elles. Lorsqu'une décharge électrique a lieu, c'est l'électricité de la périphérie du nuage qui s'élance en étincelles ; elle forme à elle seule le coup de foudre, et aucune portion intérieure n'a pu y concourir à cause de l'isolement dont nous avons parlé. Mais, après que la décharge extérieure a rompu l'équilibre, il s'opère une série de décharges partielles entre toutes les individualités composant par leur réunion la nuée générale, jusqu'à ce que toutes les réactions se soient équilibrées de nouveau. Ce sont ces décharges multipliées en tous sens, entre les nuelles, leurs mamelons et leurs flocons, qui produisent le roulement et le ronflement du tonnerre. C'est à cause de ces décharges intérieures, de leur rapprochement ou de leur éloignement de l'observateur, que le bruit paraît tantôt se rapprocher et tantôt s'éloigner. »

D'après cette manière de voir, un coup de tonnerre général, c'est-à-dire une décharge électrique entre deux nuages de grandes dimensions, doit être précédé et suivi d'un nombre plus ou moins grand de décharges partielles. Tous ces effets se traduisent d'ailleurs par des variations très-rapides sur les électromètres soumis à l'influence d'un nuage électrisé.

1054. Avant Peltier, le phénomène était généralement compris d'une manière différente. Les éclairs ayant de grandes dimensions et une marche irrégulière en zigzag, l'observateur ne perçoit pas au même moment le bruit de la décharge totale, quoique la durée de l'étincelle soit inappréciable ; l'intensité du son, au bout d'un certain temps après l'explosion, dépend du nombre de points suivant lesquels le tracé général de l'éclair est coupé par une sphère ayant pour centre l'oreille de l'observateur, et pour

(1) *Notice sur la vie et les travaux de Peltier*, p. 512.

rayon l'espace parcouru par le son pendant cet intervalle de temps. On expliquait ainsi les renflements du son pendant le coup de tonnerre et l'on attribuait les roulements consécutifs à la réflexion du son, soit sur les nuages eux-mêmes, soit sur les objets terrestres. Ces causes interviennent sans doute pour une part dans le phénomène, mais elles ne permettent pas d'expliquer les roulements qui précèdent souvent les coups de tonnerre et présentent la plus grande analogie avec les roulements qui le suivent. La théorie esquissée par Peltier paraît plus satisfaisante et, en raison même de la multiplicité des effets électriques qu'elle fait intervenir, elle permet de rendre compte de toutes les observations. Ainsi encore, on peut remarquer qu'un nuage ordinaire parcourt souvent une étendue du ciel considérable sans que la forme de son contour soit sensiblement modifiée. Un nuage électrisé, au contraire, éprouve des transformations continuelles ; on y voit des protubérances se développer et grandir brusquement en certains points, pour se retirer ensuite, dénotant ainsi des mouvements internes dans lesquels les actions électriques entre les flocons et les mamelons jouent probablement un rôle important.

1055. **Des éclairs.** — Quelle que soit leur forme, les éclairs paraissent le plus souvent avoir une durée très-sensible, mais c'est une illusion due à la persistance des impressions sur la retine. Pour le démontrer, Wheatstone recevait la lumière des éclairs, pendant la nuit, sur un disque blanc portant des rayon noirs très-serrés, auquel il imprimait un mouvement de rotation très-rapide autour de son centre. Le disque apparaît au moment d'un éclair, mais les rayons semblent toujours immobiles, à cause de la courte durée de l'illumination : la durée d'un éclair est inférieure au temps nécessaire pour qu'un des rayons vienne se mettre à la place du suivant, sans quoi le disque devrait apparaître avec une teinte grise générale. Connaissant la distance des rayons et la vitesse de rotation du disque, on peut en déduire la durée d'un éclair ; les observations ont montré que cette durée n'atteint pas la millième partie d'une seconde de temps, ce qui est tout à fait concordant avec les résultats obtenus pour les décharges de batteries.

1056. Arago a divisé les éclairs en trois classes distinctes.

Les éclairs de la *première classe* consistent en un trait de feu, très-arrêté sur les bords, dessinant dans l'espace les zigzags les plus prononcés, c'est-à-dire ayant l'apparence d'une étincelle obtenue dans l'air entre deux conducteurs.

La distance d'un éclair à l'observateur peut être déterminée par le temps qui s'écoule entre l'apparition du phénomène et l'audition du coup de tonnerre, à l'aide de la vitesse de propagation du son. D'autre part, si l'on évalue en même temps l'angle apparent des extrémités de l'éclair, on peut en déduire sa grandeur absolue. Or les observations ont montré que des éclairs de première classe atteignent, dans certains cas, 12 ou même 15 kilomètres de longueur. Ces effets peuvent paraître extraordinaires si on les compare aux étincelles de nos machines; mais il faut remarquer que, dans un espace occupé par des nuages d'une manière discontinue, la propagation des décharges est beaucoup plus facile que dans l'air ordinaire. Les éclairs qui paraissent uniques sont formés sans doute d'une succession d'étincelles comme dans les appareils étincelants (774), ce qui peut en augmenter la longueur apparente dans des proportions énormes. D'autre part, la raréfaction de l'air et la hauteur des nuages est déjà assez grande pour faciliter l'écoulement de l'électricité, et enfin nous avons vu (479) qu'à partir de certaines distances explosives, la longueur des étincelles croît d'une manière beaucoup plus rapide que la différence des potentiels des corps entre lesquels a lieu la décharge. Cette grande longueur des éclairs ne peut donc donner aucune idée de la quantité d'électricité accumulée sur les nuages.

1057. Les éclairs de *deuxième classe*, qui sont de beaucoup les plus fréquents, consistent en lueurs instantanées qui illuminent les nuages, tantôt sur leur contour seulement, tantôt dans toute leur étendue, de couleurs variables plus ou moins intenses; ces éclairs ne sont quelquefois accompagnés d'aucun bruit appréciable. On doit attribuer ces lueurs soit à des éclairs ordinaires cachés à l'observateur par des nuages intermédiaires, soit à des décharges partielles qui s'effectuent dans l'intérieur d'un nuage entre les éléments qui le constituent. Les éclairs dits *de chaleur* formés par des lueurs que l'on aperçoit quelquefois à l'horizon, même sans nuages apparents, rentrent dans la même catégorie

et doivent être attribués à des orages, trop éloignés pour être entendus, qui illuminent de temps en temps l'atmosphère.

1058. Enfin Arago appelle éclairs de *troisième classe* un phénomène en apparence très-différent. On a cru apercevoir quelquefois par les temps d'orage des globes de feu de volume très-variable, qui traversent l'atmosphère avec une vitesse plus ou moins grande, se dirigent vers la terre, rebondissent à sa surface comme des balles élastiques, se promènent lentement sans produire aucuns dégâts, même sur des matières combustibles sans les enflammer, enfin disparaissent subitement, tantôt sans aucun bruit, tantôt avec détonation comparable à celle d'une pièce d'artillerie et en produisant sur les corps voisins les effets habituels de la foudre. Si l'existence du *tonnerre en boule* avec des propriétés si singulières était parfaitement démontrée, elle constituerait un des problèmes d'électricité les plus difficiles à résoudre ; mais, quand on se reporte aux récits d'après lesquels les boules de feu électriques ont pris crédit dans la science, on voit bientôt que les observations sont dues le plus souvent à des personnes dont l'éducation scientifique était très-insuffisante et qui ont pu se laisser tromper par des illusions grossières.

Si l'on suppose, par exemple, qu'un éclair soit vu dans sa propre direction, il fera sur l'œil de l'observateur l'effet d'une boule de feu d'un grand éclat qui paraîtra durer un certain temps, à cause de la persistance des impressions sur la rétine. Que l'observateur reporte alors son regard sur les objets qui l'entourent, il transportera l'impression lumineuse dans la direction de la vision et pourra faire voyager la boule sur des corps quelconques avec une vitesse plus ou moins grande. L'impression s'évanouit ensuite d'elle-même, surtout si l'esprit de l'observateur est frappé par un autre phénomène qui attire son attention, tel que le bruit du tonnerre, qui arrive au bout d'un temps très-court après l'apparition de l'éclair si l'orage est très-rapproché, et ce bruit pourra être attribué à l'explosion de la boule qui a disparu. Il existe d'ailleurs des relations d'après lesquelles plusieurs personnes différentes ont vu des boules de feu en même temps dans différentes parties d'un même édifice, et l'on peut s'assurer que la plupart des observations citées dans la science peuvent être expliquées de la même manière.

1059. **Du paratonnerre.** — L'Académie des sciences a publié à plusieurs reprises des instructions pour la construction des paratonnerres. L'une d'elle a été rédigée en 1823 par Gay-Lussac, et deux autres par Pouillet en 1854 et en 1867. Ces instructions sont la mise en pratique des principes posés d'abord par Franklin. Un paratonnerre se compose essentiellement d'une longue tige de métal terminée en pointe à la partie supérieure et communiquant avec le sol par des corps bons conducteurs. La longueur de la tige et la manière dont la pointe est effilée influent beaucoup sur le jeu électrique d'un paratonnerre. On recommandait autrefois des pointes de platine très-aiguës, mais l'expérience a montré que de pareilles pointes sont souvent fondues par l'effet des décharges électriques, et que l'extrémité de la tige ne tarde pas à s'émousser. D'ailleurs le platine n'est pas le métal qui convienne le mieux, car il s'échauffe beaucoup, parce qu'il offre une grande résistance à l'électricité, de sorte qu'en réalité il fond plus facilement que le cuivre. La pointe qui termine la tige doit être formée, d'après l'instruction de 1854, par un cône de 30°, en platine ou en cuivre platiné pour éviter l'oxydation, ou même simplement en cuivre. M. Perrot [1] recommande, au contraire, de terminer la tige par une couronne de pointes dirigées dans tous les sens ; il croit que les pointes multiples étendent beaucoup le cercle de protection et rendent le paratonnerre plus efficace.

La précaution la plus importante est de maintenir une continuité parfaite entre la tige et le sol par un câble conducteur, puis d'établir une communication conductrice entre ce câble et la terre au moyen d'une nappe d'eau, ou d'un sol humide comme le fond d'un puits, ou par tout autre procédé équivalent. Si l'édifice que l'on veut protéger renferme de grandes masses conductrices, comme des charpentes en fer, il est nécessaire de les mettre en communication avec le paratonnerre, car ces masses métalliques, sous l'influence d'un nuage électrisé, prendront un potentiel très-différent de celui de la tige ; il pourra se produire des étincelles entre ces deux conducteurs, et le voisinage du paratonnerre deviendrait un danger plutôt qu'une protection.

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LVI, p. 357.

L'efficacité principale des paratonnerres consiste surtout à décharger d'une manière silencieuse les nuages électrisés qui passent dans leur sphère d'action, en laissant échapper par la pointe de l'électricité de sens contraire. On est assuré qu'ils remplissent ce rôle, car on les voit s'illuminer pendant la nuit comme les pointes d'un conducteur soumis à une influence électrique. Si le débit d'électricité fourni par la pointe est insuffisant, il peut arriver que le paratonnerre soit foudroyé, c'est-à-dire reçoive une décharge directe sous forme d'étincelle ; dans ce cas, l'édifice n'en a pas moins été protégé, mais l'instrument est souvent mis hors d'usage.

Une question difficile à résoudre est de savoir à quelle distance un paratonnerre exerce une action efficace. On admet généralement, depuis Gay-Lussac, que la protection s'étend horizontalement à une distance double de la longueur de la tige ; mais il ne peut y avoir à ce sujet de règle générale. Les nuages orageux se trouvent à des hauteurs différentes, marchent avec des vitesses variables et possèdent des quantités d'électricité plus ou moins grandes, de sorte que le débit d'électricité que devra fournir le conducteur du paratonnerre dépend d'une foule de circonstances contre lesquelles on n'est jamais sûr d'être absolument garanti. Le moyen le plus correct de soustraire un corps à l'action de l'électricité des nuages serait de l'entourer complétement par un conducteur fermé, ou simplement par une sorte de grillage métallique relié avec la terre à l'aide de communications multiples. En supposant même qu'il n'y ait aucun écoulement d'électricité, un pareil conducteur reste toujours au potentiel du sol et maintient le même potentiel sur tous les corps, conducteurs ou non, qu'il enveloppe. Si ce grillage est en outre muni de pointes nombreuses disséminées de toutes parts, les fuites d'électricité auront lieu de plusieurs côtés à la fois, par l'intermédiaire de conducteurs dont la section sera toujours suffisante, et l'appareil présentera les meilleures garanties de protection. C'est là le principe que M. Melsens a appliqué dans la construction du beau paratonnerre dont il a entouré l'hôtel de ville de Bruxelles. Toutes les parties saillantes de l'édifice ont été munies de gerbes de pointes reliées les unes aux autres par des conducteurs nombreux qui courent le long du faîte des toits,

contournent les ornements en relief, suivent tous les angles des murs et pénètrent par plusieurs points dans le sol, avec la surface duquel ils sont mis en communication pour profiter de la conductibilité qu'y produit la première chute de pluie, et sont enfin soudés aux conduites de distribution d'eau dans la ville. On peut juger que quelques-unes des précautions prises par M. Melsens sont superflues, mais l'ensemble de la construction forme, sans aucun doute, le plus beau modèle de paratonnerre qui ait été réalisé.

1060. **Electricité atmosphérique par un ciel serein.** — L'origine de l'électricité des nuages doit être cherchée dans un état antérieur de l'atmosphère; la condensation des vapeurs peut être un moyen d'accumuler sur ces corps assez conducteurs l'électricité disséminée dans un certain espace, mais elle ne paraît pas devoir être la source même de l'électricité, parce que dans tout phénomène pareil il se produit toujours des quantités égales d'électricités de sens contraires. Lemonnier, en effet, a découvert en 1752 (1), quelques jours après l'expérience de Dalibard, qu'une tige verticale conductrice et isolée s'électrise presque toujours par un ciel absolument pur et peut donner des étincelles. Il a même constaté les indices d'une variation diurne régulière de l'état électrique de l'air, quand le ciel est pur, tandis que l'électricité est généralement insensible par les grands vents, les temps couverts et pluvieux. Cette électricité, fournie par un ciel pur, s'est toujours montrée positive.

1061. Avant d'aller plus loin dans l'étude de ces phénomènes, il importe de définir exactement le problème et de préciser quelles sont les conséquences que l'on peut déduire des différentes méthodes d'observation.

Quelle que soit la distribution des couches électriques qui agissent sur les appareils, qu'elles résident à la surface du sol ou dans les régions supérieures de l'atmosphère, ou qu'elles soient disséminées dans toute son étendue, il y a en chaque point un potentiel déterminé. La surface du sol, pouvant être considérée comme un bon conducteur, se trouve à un potentiel constant et forme une surface du niveau. Le potentiel augmente

(1) *Mémoires de l'Académie des sciences* (1752), p. 233.

en valeur absolue quand on s'élève, puisqu'une tige isolée verticale se charge d'électricité positive à sa partie inférieure. Si le ciel est pur et l'air calme, les surfaces de niveau électrique au-dessus d'une plaine doivent former, par raison de symétrie, une série de plans horizontaux, tandis qu'elles se relèvent dans le voisinage d'une montagne et reproduisent d'une manière plus ou moins fidèle tous les accidents qui existent à la surface du sol. La seule quantité qui soit définie et qu'il y ait à déterminer, c'est la différence de potentiel qui existe entre un point de l'atmosphère et le sol lui-même, sans que cette observation isolée puisse rien indiquer sur la position véritable des masses électriques influentes. Les instruments d'observation seront donc d'autant plus parfaits qu'ils détermineront plus exactement cette différence de potentiel. Nous supposerons, pour simplifier le langage, que le potentiel du sol est nul.

1062. **Méthodes d'observation.** — Considérons, par exemple, une tige de métal verticale parfaitement isolée. Cette tige prend un potentiel constant, plus faible que celui des couches d'air voisines de son extrémité supérieure, mais plus élevé que le potentiel du sol, et elle se montrera positive par rapport aux conducteurs qui sont en communication avec la terre. Le potentiel de cette tige est le même que celui de la couche de niveau atmosphérique qui passe par la ligne neutre; mais la position de ligne neutre dépend de la loi de distribution des masses influentes, de sorte que le potentiel de la tige n'est pas proportionnel en toute rigueur à celui des couches d'air voisines de son extrémité, et qu'il ne représente pas le potentiel d'une région déterminée de l'atmosphère. Si l'état de l'air était constant et la déperdition d'électricité nulle, il suffirait de mettre la tige un instant en communication avec le sol pour que son potentiel fût nul, et restât nul indéfiniment; l'appareil ne serait plus sensible qu'aux variations de l'état électrique de l'atmosphère. Si, au contraire, il s'effectue des déperditions par le contact de l'air sur toute la surface de la tige, son potentiel augmentera de nouveau d'une manière plus ou moins rapide, jusqu'à ce que les déperditions d'électricité négative par la partie supérieure et d'électricité positive par la partie inférieure soient devenues équivalentes. Le nouveau potentiel sera encore une fraction, va-

riable avec les conditions de l'expérience, de celui qui existe dans l'air au voisinage du sommet de la tige.

Tel est le cas des appareils qu'a employés le P. Beccaria dans ses longues séries d'observations sur l'électricité atmosphérique. Un fil de fer dit *explorateur*, de 132 pieds de longueur, était isolé et tendu entre le haut d'une cheminée et une branche de cerisier; un fil *déférent*, partant du voisinage de l'extrémité supérieure, communiquait avec un électromètre à boules situé dans l'intérieur du laboratoire. Quand on avait ramené les boules à l'état neutre en les touchant, il fallait quelquefois plus d'une minute par un temps serein pour que la divergence des boules reprit sa valeur primitive, tandis que dans d'autres circonstances le même résultat était atteint au bout d'une seconde. La lenteur (lentezza) et la rapidité (frequenza) d'électrisation doivent être attribuées soit à une déperdition d'électricité variable avec l'état hygrométrique, soit à des particules électrisées que le vent amène au contact de la tige et qui font varier rapidement son potentiel. M. Thomson [1] a observé des effets analogues sur un électromètre qui communiquait avec un conducteur isolé exposé à la pluie ou au brouillard.

1063. Reprenons encore l'exemple de la tige isolée et supposons que l'extrémité supérieure soit terminée par une pointe, comme dans les expériences de Franklin, Lemonnier, De Saussure, etc. La déperdition d'électricité par la pointe devient beaucoup plus grande, la ligne neutre se rapproche du sommet de la tige et le potentiel du conducteur tend à devenir égal à celui des couches d'air situées autour de la pointe ; les indications deviennent donc beaucoup plus régulières. Toutefois, l'efficacité d'une pointe métallique est tout à fait insuffisante pour de faibles différences de potentiel, et il peut arriver encore que la déperdition qui a lieu sur la surface entière de la tige domine l'effet de la pointe, auquel cas on rencontrera toutes les incertitudes que présente la méthode de Beccaria.

Volta eut l'idée en 1787 [2] de terminer la tige de Franklin par une petite bougie ou un fil soufré que l'on allume au mo-

[1] *Reprint of papers*, p. 226.

[2] *Lettres sur la météorologie électrique*. Collezione dell' opere di Volta, t. I, parte II, passim.

ment de l'expérience. Il reconnut que la flamme par elle-même ne donne pas d'électricité sensible, et que l'électromètre employé par De Saussure (262) se charge d'une quantité d'électricité double quand on ajoute cette flamme à l'extrémité de la pointe, ce qui confirme les remarques précédentes sur l'inefficacité des pointes métalliques. L'appareil devient ainsi un véritable égaliseur de potentiel (859); en outre, comme l'état électrique de l'atmosphère n'est pas modifié d'une manière appréciable par la quantité d'électricité que laisse échapper la flamme, on se trouve en présence d'une véritable source d'électricité et l'on peut avoir recours aux électroscopes condensateurs pour rendre les effets plus manifestes, dans le cas où l'électrisation serait trop faible. Volta reconnut que la grandeur de la flamme était à peu près indifférente, que deux mèches ne donnaient pas plus d'électricité qu'une seule, et qu'on pouvait aussi se servir de corps donnant de la fumée sans flamme, quoique l'effet fût alors moins marqué. Son appareil se composait d'une simple bougie ou d'une lampe ordinaire placée dans une lanterne ouverte. La flamme était isolée à l'extrémité d'une tige et mise en communication par un fil, soit avec une bouteille de Leyde, soit avec un électromètre; on supprimait ensuite cette communication pour faire les observations.

M. Thomson a remis en faveur cette méthode de Volta. Pour les électromètres portatifs, il les munit d'une longue tige dont la pointe est terminée, soit par une mèche imbibée d'alcool, soit plutôt par une baguette de papier roulé, imprégné de nitrate de plomb. Ce papier, en brûlant, s'effile en pointe d'une manière régulière et les gaz chauds qui proviennent de la combustion remplissent le même office qu'une flamme, dont l'entretien est toujours plus difficile. Pour les instruments à poste fixe, M. Thomson fait communiquer l'une des électrodes ou l'aiguille d'un électromètre avec un vase de métal isolé renfermant de l'eau; ce vase est muni d'un tube conducteur par l'extrémité duquel on laisse écouler une petite quantité d'eau. L'aiguille ne tarde pas à prendre exactement le potentiel des couches d'air qui entourent l'orifice d'écoulement, si les gouttes sont discontinues, ou celui des couches qui sont situées au voisinage du point où la veine liquide se résout en gouttelettes.

1064. Enfin une dernière méthode consiste à recueillir l'électricité qui se produit à la partie supérieure d'un conducteur soumis à l'influence de l'électricité atmosphérique. Supposons, par exemple, qu'une sphère conductrice placée dans ces conditions soit mise en communication avec le sol par un fil de capacité très-faible; pour que le potentiel de cette sphère se maintienne égal à zéro, il faut que sa surface se recouvre d'une quantité d'électricité capable d'y produire un potentiel égal et de signe contraire à celui que l'électricité de l'atmosphère elle-même possède sur ce conducteur. Si le potentiel de l'électricité atmosphérique est positif et égal à V au centre de la sphère, celle-ci se chargera d'une certaine quantité — M d'électricité négative. En désignant par R le rayon de la sphère, on aura donc pour le centre

$$V - \frac{M}{R} = 0 \quad \text{ou} \quad M = VR.$$

Il suffit alors d'isoler la sphère, de la transporter dans un laboratoire et de la mettre ensuite en communication avec un électromètre primitivement à l'état neutre, pour déterminer une quantité proportionnelle à la masse d'électricité M, et par suite au potentiel V de l'air. Il serait même facile de déterminer de cette manière le potentiel de l'air en valeurs absolues. C'est la méthode employée par M. Dellmann (1).

Si le conducteur que l'on isole ainsi, après l'avoir mis en communication avec le sol, n'a pas la forme sphérique, la quantité d'électricité dont il se charge est encore proportionnelle au potentiel de l'air en un point particulier du conducteur, et pourra servir de même à étudier les variations de l'état électrique de l'air. Cavallo (2), par exemple, attachait une boule de moelle de sureau, par l'intermédiaire d'une tige isolante, à l'extrémité d'une canne de ligne à pêcher ordinaire, formée de baguettes pouvant rentrer les unes dans les autres. Cette boule portait une paire de pendules et l'on y attachait une épingle tenue par un fil conducteur en communication avec le sol. Pour observer l'électricité de l'atmosphère, on dressait cette canne en dehors d'une

(1) *Pogg. Annal.*, t. CXII, p. 631.
(2) *Traité d'électricité*, p. 295.

fenêtre ou au sommet d'un édifice, et, au bout de quelques minutes, on retirait l'épingle par le fil. Il suffisait alors de rentrer l'électromètre dans une chambre et d'observer la déviation des pendules, pour évaluer leur charge électrique et le potentiel de l'air correspondant.

On peut employer de la même manière tout autre électromètre, celui de Peltier (291), par exemple. Après avoir réglé l'instrument dans une chambre, de manière que l'aiguille mobile *ab* soit dans la direction du méridien magnétique et en contact avec l'aiguille fixe EF, la charge électrique étant nulle, on porte l'instrument sur une terrasse, on met la partie inférieure de la tige en communication avec le sol, puis on supprime cette communication et l'on rentre l'appareil dans la chambre, à la même position que primitivement. L'aiguille mobile est maintenant déviée et l'on peut par une table de graduation évaluer la charge électrique. Si la sphère est de grandes dimensions par rapport à la tige, cette quantité d'électricité provient presque exclusivement de la sphère elle-même et permet, comme dans les expériences de Dellmann, de déterminer le potentiel de l'air en valeurs absolues.

Il est facile d'imiter dans un laboratoire les effets de l'électricité atmosphérique. Quand on place un électromètre sensible, relié avec un tube d'écoulement d'eau, dans l'intérieur d'une chambre fermée où l'on n'a fait depuis longtemps aucune expérience d'électricité, l'appareil reste à l'état neutre. Si la chambre renferme des corps électrisés, comme le conducteur d'une machine en activité, l'électromètre s'électrise immédiatement et prend un potentiel égal à celui des masses influentes au point où la veine se résout en gouttelettes. Si, au contraire, on électrise l'air lui-même, en munissant de pointes le conducteur de la machine ou l'armature intérieure d'une batterie électrisée [1] dont l'armature extérieure communique avec le sol, ou encore en mettant une flamme isolée en communication avec un corps électrisé, l'électromètre indiquera encore un certain potentiel. On peut même disposer l'expérience de façon que le potentiel, au point où se trouve l'instrument, soit le même dans les deux

[1] Cavallo, *Traité d'électricité*, p. 252.

cas, d'où il résulte clairement que ce potentiel n'indique pas la situation véritable des masses électriques influentes.

1065. **Résultats des observations.** — Toutes les observations ont montré que, par un ciel serein, le potentiel dans l'air augmente de plus en plus à mesure qu'on s'élève. De Saussure, par exemple, se servait d'une canne à pêcher maintenue verticalement par des supports isolants et des cordons de soie, et mettait la partie inférieure en communication avec un électromètre. Il pouvait ainsi aller jusqu'à 15 ou 16 pieds de hauteur et obtenait une divergence des pailles d'autant plus grande que la canne était plus longue. Pour parvenir à des hauteurs de 40 ou 50 pieds, il prit une ficelle formée de trois brins d'argent filés, terminée par une balle de plomb à l'une de ses extrémités, et à l'autre bout par une boucle de métal entr'ouverte. Il passait cette boucle dans l'anneau de l'électromètre, puis lançait la balle de plomb en l'air à la plus grande hauteur possible ; la divergence des pailles correspondait au potentiel atteint par le conducteur au moment où la boucle se détachait de l'électromètre.

MM. Becquerel et Breschet (1), dans une série d'observations au grand Saint-Bernard, lançaient en l'air une flèche maintenue en communication avec un électromètre par un fil de soie recouvert de clinquant. Pour s'assurer que l'électricité transmise par la flèche n'était pas due au frottement de l'air, il suffisait de la tirer horizontalement ; ordinairement il ne se produisait aucune trace d'électricité. Quand la flèche était lancée verticalement, les pailles divergeaient d'autant plus que la flèche parvenait à une plus grande hauteur, et étaient toujours électrisées positivement.

Enfin, pour aller encore plus loin, on peut faire monter dans l'air un cerf-volant maintenu en communication avec un électromètre par un cordon conducteur et isolé. Si le cerf-volant est muni de pointes aiguës, il mettra constamment l'électromètre au potentiel de la couche d'air dans laquelle il plane.

Dans une ascension en aérostat, Gay-Lussac et Biot mirent un électroscope placé dans la nacelle en communication avec un fil de métal de cinquante mètres de longueur qui pendait librement et était tendu par une boule de métal ; ils reconnurent que l'é-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. VI, p. 528.

lectricité des pailles était négative. Cette expérience est encore concordante avec toutes les précédentes, puisque l'on observait alors l'électricité de l'extrémité supérieure du conducteur soumis à l'influence de l'atmosphère.

Les différences de niveau que l'on peut atteindre à la main permettent même de montrer aisément cette variation régulière des potentiels. Ainsi, quand on tient à une certaine hauteur un électroscope terminé par une boule, comme celui de Peltier, et qu'on le met en communication avec le sol, les pailles ne divergent pas d'une manière appréciable : le conducteur est à un potentiel nul et l'électricité négative dont il est chargé se maintient à la partie supérieure. Isolant l'appareil, on l'élève de 40 ou 50 centimètres : les pailles divergent et sont chargées d'électricité positive, parce que le potentiel du conducteur a augmenté. Si l'on descend l'appareil au-dessous de sa position primitive, les pailles divergent de nouveau, mais cette fois elles sont électrisées négativement. Si l'on déplace l'électromètre horizontalement au-dessus d'une plaine, le potentiel ne change pas ; mais si la première observation a été faite auprès d'un mur élevé, et qu'on s'en éloigne ensuite en maintenant l'appareil à la même hauteur, le potentiel augmente de plus en plus.

De Saussure a constaté encore que, pour un même état de l'atmosphère, les signes électriques sont beaucoup plus manifestes sur les hauteurs que dans la plaine, et que la hauteur relative du lieu où se fait l'observation, par rapport aux objets qui l'entourent, a beaucoup plus d'influence que l'altitude absolue sur la force apparente de l'électricité atmosphérique. Ainsi l'électricité était plus forte à l'angle d'une terrasse dominant de 15 ou 20 pieds la campagne environnante qu'au milieu d'un plateau étendu qui couronnait une colline élevée. En effet, les couches de niveau doivent être d'autant plus resserrées que la surface du sol présente des reliefs plus marqués, de sorte que, sur une éminence isolée, un petit changement de hauteur donnera une variation de potentiel beaucoup plus grande.

1066. En un même lieu et à la même hauteur, l'état électrique éprouve des changements continuels et périodiques aux différentes heures de la journée, et, indépendamment des causes accidentelles qui peuvent modifier l'état de l'atmosphère, l'élec-

trisation moyenne de la journée est variable avec les différentes époques de l'année. Ces variations ont été constatées par tous les physiciens qui se sont occupés de ce genre de recherches ; nous emprunterons quelques résultats aux observations suivies que Quetelet a faites à Bruxelles de 1844 à 1849 (1).

1° L'électricité de l'air subit une variation diurne qui présente généralement deux maxima et deux minima ; l'heure de ces maxima et minima varie aux différentes époques de l'année.

2° Le premier maximum arrive en été avant 8 heures du matin et vers 10 heures en hiver ; le second maximum s'observe après 9 heures du soir en été et vers 6 heures en hiver.

3° Le minimum du jour se présente vers 3 heures en été et vers 1 heure en hiver ; les observations sont insuffisantes pour déterminer la marche du minimum de la nuit.

4° En comparant ces résultats avec les autres éléments météorologiques, on trouve que les variations de l'électricité concordent d'une manière remarquable avec les oscillations diurnes du baromètre et surtout avec les variations de la déclinaison magnétique. On remarquera encore que les maxima d'électricité ont lieu aux heures où les changements de température sont plus rapides, et les minima aux moments où le thermomètre est à peu près stationnaire.

5° L'instant qui représente le mieux l'état électrique moyen de la journée, dans les différentes saisons, arrive vers 11 heures du matin.

6° Dans le cours de l'année, l'électricité atteint son maximum en janvier, puis décroît progressivement jusqu'au mois de juin qui présente un minimum d'intensité, pour augmenter de nouveau ; le maximum et le minimum de l'année ont pour valeurs respectives 605 et 47, de sorte que l'électricité en janvier est 13 fois aussi énergique qu'au mois de juin.

Quant à la valeur absolue des potentiels atmosphériques, on ne peut pas l'indiquer d'une manière exacte, parce que l'état électrique dans le voisinage de la terre éprouve des changements continuels. M. Thomson a observé, à l'île d'Arran, que la différence de potentiel de deux points situés à un pied de distance

(1) *Annuaire météorologique de la France*, pour 1850, p. 161.

verticale équivaut à celle de 20 à 40 couples Daniell; mais on trouve souvent des valeurs 8 ou 10 fois plus grandes, et quelques minutes suffisent quelquefois pour faire varier le potentiel du simple au quadruple, même par un ciel calme ou avec une légère brise de l'est.

Lorsque le ciel est couvert, l'état électrique de l'air est généralement plus faible que dans les temps sereins ; l'électromètre peut même accuser de l'électricité tantôt positive et tantôt négative. Tous les phénomènes atmosphériques, les nuages, la pluie, la neige, le brouillard, la direction et la vitesse du vent influent sur l'état électrique de l'air, et il est difficile d'indiquer à ce sujet des résultats qui aient un certain caractère de généralité. Les nuages eux-mêmes sont tantôt positifs et tantôt négatifs ; il se rencontre donc dans l'air, au moins par les temps agités, des masses chargées d'électricités différentes.

Une fois bien établie l'existence d'une succession régulière des potentiels par les temps sereins, il est clair qu'une masse de vapeur se condensant en nuage sous ces diverses influences, même en supposant que l'air lui-même ne soit pas électrisé, devra s'électriser en général, tantôt d'une manière et tantôt d'une autre, suivant qu'elle se sera détachée d'un autre nuage par la partie supérieure ou la partie inférieure, qu'elle se sera partiellement résolue en pluie, qu'elle aura touché le flanc d'une montagne, etc., et le nombre des circonstances analogues que l'on peut imaginer est pour ainsi dire illimité.

1067. **Siége et origine de l'électricité atmosphérique.** — Les phénomènes électriques complexes qui se manifestent par les temps agités pouvant ainsi être expliqués par l'état antérieur de l'air, la seule question dont il y ait à se préoccuper, au point de vue théorique, est donc l'état électrique de l'air en dehors de tous ces accidents. Nous reproduirons à ce sujet, et d'une manière presque textuelle, quelques considérations remarquables dues à M. Thomson (1).

La surface extérieure de la terre, déterminée par tous les corps conducteurs qui sont en communication avec elle, est à chaque instant électrisée en tous ses points, puisque son potentiel

(1) *Reprint of papers*, p. 192 et suiv

est tantôt plus élevé, tantôt plus faible que celui de l'air ambiant, sauf sur les lignes neutres qui séparent les parties négatives des parties positives.

Les parties négatives sont de beaucoup les plus étendues et il doit même arriver que la surface entière soit négative. En effet, on cite à peine quelques observations dans lesquelles l'air se soit montré négatif par un temps serein. Beccaria n'a constaté ce signe que 6 fois pendant 15 années d'observations assidues, mais c'était presque toujours par un vent sensible, et l'électricité négative pouvait être attribuée à des régions voisines où l'atmosphère était agitée. Par les mauvais temps, pendant la pluie ou immédiatement après, l'électrisation est généralement plus faible et les signes très-variables. On peut donc affirmer que, si le hasard voulait qu'à un instant donné le temps fut serein sur toute la surface du globe, cette surface serait à cet instant négative en tous ses points.

Quant à l'air lui-même, aux nuages et aux autres masses électrisés suspendus dans l'atmosphère, on n'a jusqu'à présent d'autres indications sur leur état électrique que celles qui sont fournies par l'état électrique du sol lui-même et les variations de cet état. Comme Peltier l'a remarqué depuis longtemps, toutes les observations d'électricité atmosphérique faites jusqu'à présent ne se rapportent pas à autre chose. Il est impossible de déduire l'état électrique d'un corps non conducteur des actions qu'il exerce à l'extérieur, car il existe une infinité de distributions d'une même masse électrique, dans un espace déterminé, qui sont capables de donner à l'extérieur les mêmes surfaces de niveau. On ne pourrait y parvenir qu'en déterminant à chaque point la grandeur et la direction de la résultante, puisque la densité est liée à la manière dont varient les dérivées premières du potentiel, ou les projections de cette force (142). La solution serait ainsi complète ; mais on peut remarquer que, si l'on voulait connaître seulement la quantité totale d'électricité, il suffirait de déterminer la valeur de la composante normale en tous les points de la surface (159). Il faudrait pour cela faire une série d'expériences tout autour de la masse considérée et les observations en ballon deviendraient alors indispensables.

Cependant, sans quitter la terre et, par conséquent, sans pou-

voir arriver à une connaissance complète de l'état de l'électricité dans l'atmosphère, on peut déduire quelques conséquences importantes des changements de densité électrique qui surviennent à la surface du sol.

Si la terre était simplement un corps électrisé, placé dans un milieu indéfini parfaitement isolant, soustrait à l'action directe de tout autre corps électrisé et à l'action réflexe de tout corps conducteur ou non placé dans son voisinage et soumis à son influence, la distribution de l'électricité à la surface serait parfaitement définie : elle ne dépendrait que de la forme de cette surface et, théoriquement, on pourrait la déduire par le calcul des données purement géométriques que fournit la géodésie. Si c'était, par exemple, une ellipsoïde, la densité électrique en chaque point varierait proportionnellement à la perpendiculaire abaissée du centre sur le plan tangent en ce point (66). La densité serait maximum sur l'équateur, mais ne dépasserait que de $\frac{1}{300}$ la densité à chaque pôle.

Considérons maintenant une portion étendue de la surface, unie ou couverte d'accidents de toute nature. La quantité totale d'électricité qui y sera contenue sera très-approximativement la même que sur une nappe liquide absolument calme qui serait la projection de la surface réelle ; mais cette quantité d'électricité sera distribuée d'une façon très-irrégulière, plus grande sur les parties proéminentes et les surfaces convexes, plus faible sur les parties abritées et concaves ; absolument nulle dans l'intérieur d'une cavité, sur le sol d'une forêt, sur les parois d'un tunnel ou d'un appartement, alors même que les ouvertures auraient une valeur angulaire considérable.

Si cette espèce de géodésie électrique, déterminée par les expériences, donnait en tous les points de la terre une même valeur pour la densité réduite, on serait en droit de conclure que l'état électrique du sol est tout à fait indépendant de celui de l'air. Dans ce cas, il n'y aurait que trois hypothèses possibles : ou il n'y a pas d'électricité dans l'atmosphère, ni au-delà, jusqu'aux étoiles les plus éloignées, et alors les lignes de force qui émanent de la terre peuvent s'étendre jusqu'à l'infini ou se terminer à la lune, aux astéroïdes, au soleil, aux planètes, aux étoiles ; ou bien, à une distance considérable dépassant de beaucoup les plus

hautes montagnes, il y a une couche d'électricité de densité uniforme, de quantité égale et de signe contraire à celle du globe, faisant équilibre sur un point extérieur à l'action exercée par cette dernière, et limitant par conséquent cette action à la portion de l'atmosphère située au-dessous d'elle; ou bien, enfin, il n'y a dans l'atmosphère que des masses électriques présentant quelqu'un de ces modes de distribution en nombre infini en vertu desquels l'action est nulle sur tout point extérieur, et qui ne peuvent, par conséquent, modifier la distribution de l'électricité à la surface du sol.

En réalité, la densité électrique, même par le beau temps, est très-différente à un même instant aux différents points de la terre. Les variations qu'elle éprouve, dans le cours de la journée et aux différentes saisons, démontrent que l'état électrique du sol est profondément influencé par des masses électriques extérieures. On ne peut pas déduire la position exacte et la distribution de ces masses de l'effet qu'elles produisent sur la surface; cependant le caractère des perturbations qu'elles y amènent permettrait d'assigner une limite supérieure à leur distance. Si la densité réduite au niveau de la mer variait suivant une loi continue facile à définir analytiquement, et si les variations en un même lieu étaient connues de la même manière, il serait possible d'évaluer la position et le mouvement probables des masses influentes. Toutes les observations faites jusqu'à présent ne permettent même pas d'aborder le problème, parce qu'elles ont toujours été isolées et discontinues. Il faudrait, au contraire, faire en un même lieu des observations suivies, en inscrivant, par exemple, à l'aide de la photographie (1), les indications d'un électromètre, et installer une série d'électromètres à des distances peu éloignées, afin de déterminer si les variations qu'éprouve chacun d'eux sont dues à un accident local ou à une cause plus générale.

On voit, d'après ces considérations que nous avons abrégées et pour lesquelles nous renvoyons le lecteur aux mémoires de M. Thomson, que la question de l'électricité atmosphérique est encore loin d'être éclaircie. Il paraît bien démontré qu'il existe

(1) *Reprint of papers*, p. 225.

dans les régions supérieures de l'atmosphère des masses électriques considérables, comme l'indique encore le phénomène des aurores boréales, qui paraissent être des lueurs électriques dans l'air raréfié à une très-grande hauteur; mais la situation véritable des couches électriques, leurs déplacements et leur origine constituent des problèmes encore à peine effleurés. Pour étudier d'une manière méthodique ces questions qui ont un si grand intérêt au point de vue de la météorologie générale, il faudrait donc organiser un système d'observations complétement différent de celles qui ont été effectuées jusqu'à présent.

M. Balfour Stevart, par exemple, a installé à l'observatoire météorologique de Kew, d'après les indications de M. Thomson, un électromètre à miroir dans lequel l'état électrique de l'air se traduit par l'impression photographique de l'image d'une flamme sur une bande de papier mobile. L'examen des courbes ainsi obtenues donne une idée des variations rapides de ce phénomène et montre bien que les observations discontinues ne peuvent être suffisantes. La question de l'électricité atmosphérique paraît aujourd'hui préoccuper la plupart des météorologistes, et il y a lieu d'espérer que cette science ne tardera pas à faire de nouveaux progrès.

FIN DU SECOND ET DERNIER VOLUME.

TABLE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE SECOND VOLUME

CHAPITRE X. — DÉCHARGES CONDUCTIVES.

Phénomènes calorifiques.

Disposition des expériences. 2
Décharge totale des batteries. — Expériences de M. Riess. 3
Expériences avec le thermomètre inscripteur. 5
Décharge incomplète. — Expériences de M. Riess. 7
Décharges des cascades. — Expériences de M. Riess et de M. Dove. . 10
Distribution de la chaleur dans les différentes parties du conducteur. 11
Expériences de M. Riess. 12
Résistances spécifiques des métaux. 18
Échauffement comparatif des différents métaux. 20
Emploi de la fusion des fils comme thermomètre électrique. 22
Échauffement d'un conducteur formé de plusieurs branches. 23
Décharges dérivées. 26
Influence du milieu mauvais conducteur que traverse l'étincelle pendant la décharge. 29
Expériences relatives à l'échauffement des conducteurs. 33
Fusion et volatilisation des fils de métal. 34
Expérience de la presse électrique. 38
Torpille électrique. 39

Vitesse de propagation de l'électricité.

Diagomètre de Rousseau 40
Expérience de M. Wheatstone. 42
Expériences de Faraday. 46
Remarques sur la propagation de l'électricité. 50

CHAPITRE XI. — DÉCHARGES DISRUPTIVES.

Durée de la décharge.

Expériences de M. Feddersen 52
Expériences de M. Felici 59
Expériences de MM. Cazin et Lucas 59
Décharges des appareils d'induction 63
Étincelles composées 64

Distance explosive de l'étincelle.

Description d'un excitateur universel 66
Influence de la charge. — Expériences de M. Harris 67
Expériences de M. Riess 68
Expériences de M. Knochenhauer 69
Expériences de M. Thomson 70
Expériences de M. Gaugain 75
Expériences de MM. Wiedemann et Rühlmann 77
Recherches de M. Gaugain sur la densité explosive 81
Vérification de la loi des batteries par les décharges 84
Influence de la forme des conducteurs 86
Expériences avec des potentiels très-élevés 87
Mesures absolues 90
Pression électrostatique pour de grandes distances explosives 93
Influence de la pression sur la distance explosive. — Expériences de M. Harris 94
Expériences de Masson 94
Expériences de M. Knochenhauer 95
Expériences de MM. Wiedemann et Rühlmann 97
Non-conductibilité du vide absolu 98
Pression du minimum de résistance 103
Influence de la température 105
Influence de la nature du gaz 108
Étincelles dans les liquides 110
Réfraction de l'étincelle 112
Influence de la nature de l'électricité et de la forme des conducteurs . 113
Soupapes électriques 115

Différentes formes des décharges électriques.

Étincelle 120
Aigrette 122
Décharges des bobines d'induction 128
Lueur et décharge obscure 128
Illumination des gaz raréfiés 130
Stratifications de la lumière électrique 132
Intensité lumineuse des étincelles. — Expériences de Masson 141

Composition de la lumière électrique. 149
Expériences de M. Wheatstone. 150
Découverte du renversement des raies par Foucault. 151
Expériences de Masson. 151
Caractères spectroscopiques des différentes formes de la décharge. . 154
Modifications du spectre des étincelles électriques. 156

CHAPITRE XII. — EXPÉRIENCES D'ÉLECTRICITÉ ET PROPRIÉTÉS DE L'ÉTINCELLE.

Phénomènes calorifiques et mécaniques.

Anneaux de Priestley. 160
Expériences de Fusinieri. 161
Inflammation de matières combustibles. 162
Eudiomètres. 163
Pistolet de Volta. — Briquet électrique. 164
Mortier électrique. 165
Passage de l'étincelle au travers des corps solides. — Perce-carte. . 166
Perce-verre. 167
Fulgurites. 169
Propagation de l'électricité à la surface des corps isolants. 170
Figures de Lichtenberg. 171
Expériences de M. Wiedemann. 173
Expériences de De Sénarmont. 174
Dessins électriques. 175
Traces permanentes des étincelles. 176
Figures roriques. 177

Effets lumineux de la décharge.

Auréoles électriques. 180
Appareils étincelants. 182
Lueurs électriques dans les gaz raréfiés. 185
Phénomènes d'influence dans les gaz. 185
Pluie de feu électrique. 188
Effluves électriques. 189

Mouvements électriques.

Pantins, carillon et grêle électriques. 192
Roues électriques. 195

Effets physiologiques.

Décharges des batteries. 196
Action des courants continus. 197

Influence de l'électrotonus 198
Transmission de la contraction et de l'excitation 198
Effets des courants d'induction 199
Excitation unipolaire 200

Effets chimiques des décharges électriques.

Inflammation de mélanges détonants 202
Papillons électriques 204
Combinaisons lentes 205
Décompositions 208
Phénomènes électrolytiques 212
De l'ozone 215

Aimantation et induction par la décharge.

Observations anciennes 219
Expériences de Savary 220
Expériences de M. Marianini 223
Découverte de l'induction voltaïque 224
Décharge latérale et choc en retour 225
Induction par les décharges 229
Recherches de Verdet 233
Expériences de M. Bichat 237
Décharges analogues aux extra-courants 238
Énergie des décharges induites 240
Réactions sur le circuit principal 241

CHAPITRE XIII. — DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

Machines à frottement.

Aperçu historique 245
Machine de Ramsden 250
Théorie des machines à frottement 254
Machine de Le Roy 258
Machine de Nairne 260
Machines de Van Marum 261
Expériences de Péclet 262
Machine d'Armstrong 265
Expériences de Faraday 268

Machines électriques fondées sur l'influence et le transport.

Électrophore double 269
Duplicateurs électriques 270
Duplicateur de Nicholson 271
Machine de Tœpler 275
Machine de Holtz 276

Jeu de la machine. 278
Conducteur diamétral. 285
Machines doubles. 286
Machine à deux rotations. 289
Machine de Carré. 292
Quelques expériences relatives à la machine de Holtz. 293
Appareils de M. Thomson. 296
Égaliseurs de potentiel. 298
Machine électrique à écoulement. 301

Appareils d'induction.

Description. 305
Caractères des bobines d'induction. 308
Association des bobines. 309
Mesure du débit. 310
Rôle des condensateurs sur le fil induit. 314

Comparaison des différentes machines électriques.

Circonstances qui influent sur le débit d'électricité. 316
Évaluation du débit par les galvanomètres. 320
Débit comparé de différentes machines. 321
Débit absolu d'une machine. 324

CHAPITRE XIV. — DES SOURCES D'ÉLECTRICITÉ.

Électricité de contact.

Expériences de Galvani. 333
Expériences de Volta. 336
Loi du contact. 340
Loi des tensions. 341
Principe de la pile de Volta. 343
Discussion du principe de Volta. 344
Expériences de M. Thomson. 348
Action des liquides. 351

Séries de tensions.

Contact de deux métaux. 352
Expériences de M. Kohlrausch. 353
Expériences de M. Hankel. 359
Contact d'un métal et d'un liquide. 361
Expériences de M. Hankel. 365
Deux métaux et un liquide. 368

Force électromotrice. 369
Contact des liquides. 372
Deux liquides et deux métaux. 376
Comparaison des forces électromotrices. 378
Couples à gaz. 381
Polarisation des électrodes. 383

Phénomènes électrostatiques dans les piles.

Construction des piles électriques. 387
Théorie de Biot. 388
Théorie basée sur les différences de potentiel. 393
Vérifications expérimentales — Pile non isolée. 396
Pile isolée. 403
Mesures absolues des forces électromotrices. 408

CHAPITRE XV. — DES SOURCES D'ÉLECTRICITÉ (suite).

Phénomènes thermoélectriques.

Circuits de plusieurs métaux. 412
Circuits formés d'un seul métal. 415
Circuits à liquides. 425
Lois des courants thermoélectriques. 425
Vérifications expérimentales. 428
Variation des forces électromotrices avec la température. — Couples à marche uniforme. 431
Couples à marche non uniforme. 435
Applications à la thermométrie. 439

Lois de la propagation de l'électricité.

Principes généraux. 444
Propagation dans un fil cylindrique. 447
État permanent 449
État variable. 452
Courant dans un circuit fermé. 455
Association des couples. 457
Dérivation des courants 459
Loi de Joule. 460
Phénomène de Peltier. 461
Hypothèse de M. Clausius. 463
Vérifications expérimentales. — État permanent. 464
Expériences de M. Gaugain. 465
État variable. 475

Relations qui existent entre les théorèmes d'électricité statique et les lois de propagation des courants. 477
Phénomènes caloritiques. 480
Transport électrique de la chaleur. 489

Pyroélectricité.

Découverte des propriétés de la tourmaline. 494
Expériences de M. Gaugain. 497
Caractères des cristaux pyroélectriques. 505
Courants pyroélectriques. 509
Thermoélectricité des cristaux. 510

CHAPITRE XVI. — DES SOURCES D'ÉLECTRICITÉ (suite.)

Actions mécaniques et physiques.

Frottement. 512
Frottement des métaux. 513
Frottement des corps isolants. 516
Frottement des métaux avec les corps isolants. 516
Frottement des liquides et des gaz. 521
Division des corps. 522
Pression. 523
Passage des corps à l'état solide. 525
Actions moléculaires. 525

Évaporation.

Expériences de Saussure. 526
Expériences de Pouillet. 528
L'évaporation n'est pas une source d'électricité. 529

Phénomènes chimiques.

Dégagement des gaz. 531
Combustion. 531
Couples à gaz thermoélectriques. 534

Électricité physiologique.

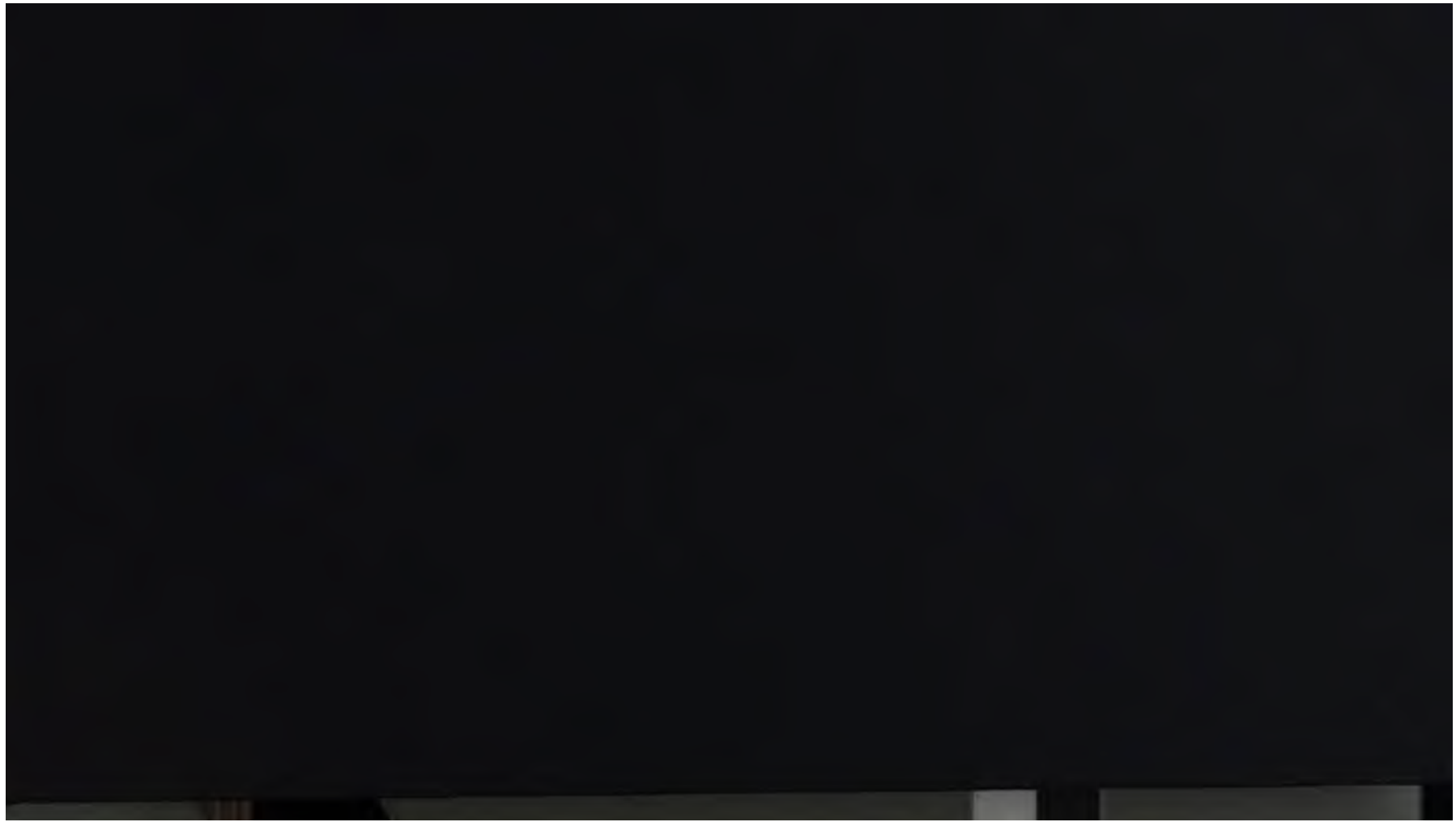
Courant propre de la grenouille. 537
Propriétés du cylindre nerveux ou musculaire 538
Influence des contractions. 541
Électricité dans les végétaux. 544

Phénomènes électro-capillaires.

Expériences de M. Becquerel 546
Expériences de M. Lippmann 547

Électricité atmosphérique.

La foudre est un phénomène électrique 555
Du tonnerre 559
Des éclairs 561
Du paratonnerre 564
Électricité atmosphérique par un ciel serein 566
Méthodes d'observation 567
Résultats des observations 572
Siége et origine de l'électricité atmosphérique 575

16945. — Typographie Lahure, rue de Fleurus, 9, à Paris.

3 2044 021 572 268